



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební ČVUT v Praze
Experimentální centrum (K210)**

**Využití odpadních ocelových vláken pro přípravu
drátkobetonů**

**Utilization of Waste Steel Fibers for the Development of
Fiber Concrete**

Diplomová práce

Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb
Vedoucí práce: Ing. Pavel Reiterman, Ph.D.

**Bc. Jan Havrda
Praha 2018**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Tháškova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Havrda Jméno: Jan Osobní číslo: 409751
Zadávající katedra: Experimentální centrum
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Využití odpadních ocelových vláken pro přípravu drátkobetonů
Název diplomové práce anglicky: Utilization of Waste Steel Fibers for the Development of Fiber Concrete

Pokyny pro vypracování:

Zpracování literární rešerše, která bude zaměřena na dosavadní zkušenosti s využíváním odpadních drátků v betonu. Příprava, realizace a vyhodnocení experimentálního programu se zaměřením na studium betonů různého složení s přídavkem odpadních drátků. Závěrem práce bude kritická diskuze dosažených experimentálních výsledků v porovnání s dostupnou zahraniční literaturou.

Seznam doporučené literatury:

G. Li et al., Development of waste tire modified concrete, Cement and Concrete Research 34 (2004) 2283-2289.
G. Centonze et al., Steel fibers from waste tires as reinforcement in concrete: A mechanical characterization, Construction and Building Materials 36 (2012) 46-57.

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Pavel Reiterman, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 12.10. 2017

Termín odevzdání diplomové práce: 7.1. 2018

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu přelomového ak. roku


Podpis vedoucího práce


Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

12.10. 2017
Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího Ing. Pavla Reitermana, Ph.D.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

.....

podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Reitermanovi, Ph.D. za jeho odborné vedení při tvorbě diplomové práce. Dále bych mu rád poděkoval za jeho rady a poznatky, které mi nepochybně pomohly. Poděkování patří i mým rodičům, kteří mě při studiích velice podporovali.

Dále děkuji firmě Montstav s.r.o. za poskytnutí vzorků z výroby a součinnosti při tvorbě této diplomové práce.

Abstrakt:

Tato diplomová práce se zabývá využitím odpadních ocelových vláken jako rozptýlené výztuže do drátkobetonů. Byly provedeny porovnávací testy betonu s komerčními a odpadními drátky. Jejich problémem použití v betonových směsích se stalo shlukování, to je hlavním problémem použití v praxi. Vytváření shluků je zapříčiněno nevhodným tvarem na koncích. Eliminace takového chování je možné tříděním na sítích. Z výsledků je zřejmé, že vzorky z odpadních drátků se běžně dostupným drátkům téměř vyrovnají. Bylo prokázáno, že betonová směs s odpadními drátky zlepšuje houževnatost a konečné pevnosti betonu. Pro vyrovnání se komerčním drátkům by bylo zapotřebí průmyslového zpracování.

Klíčová slova: *ocelové vlákno, rozptýlená výztuž, kord, beton, drátkobeton*

Abstract:

This diploma thesis deals with the utilization of waste steel fibers as a dispersed reinforcements for fiber reinforced concrete. Comparative tests of fiber reinforced concrete with commercial and waste wire were conducted in the experimental work performed. The problem of waste wires for their practical use in concrete is the clumping during mixing. Clumping wires is caused by wrong shape of their ends. Elimination of clumping is possible by their sorting on the sieve, or any additional treatment. However, the results showed that the waste wires are comparable with the commercial wires. It has been proven that the concrete mix with waste steel improves the ductility and strength of the concrete. Nevertheless, for their competitiveness the industrial processing is needed.

Keywords: *steel fiber, dispersed reinforcements, cord, concrete, fiber reinforced concrete*

Obsah

1	Úvod.....	- 3 -
2	Současný stav problematiky.....	- 4 -
2.1	Výztuž v pneumatice.....	- 4 -
2.2	Kordy	- 5 -
2.3	Výroba kordů	- 6 -
2.4	Ocelové kordy	- 6 -
2.5	Textilní kordy.....	- 6 -
2.6	Množství odpadu.....	- 7 -
2.7	Možnosti recyklace	- 8 -
2.8	Protektorování.....	- 8 -
2.9	Drcení.....	- 9 -
2.10	Spalování.....	- 10 -
2.11	Vytříděné drátky.....	- 11 -
2.12	Gumový granulát.....	- 12 -
2.13	Ocelová vlákna do betonu	- 13 -
2.14	Drátkobeton.....	- 14 -
2.15	Gumobeton	- 16 -
2.16	Současné využití odpadních drátků.....	- 16 -
3	Praktická část.....	- 17 -
3.1	Materiálové vlastnosti ocelových kordů	- 18 -
3.2	Čistota vytříděné suroviny	- 21 -
3.3	Shluky drátků	- 22 -
3.4	Geometrická analýza a měření vstupů	- 23 -
3.5	Třídění drátků	- 26 -

3.6	Použité materiály, směs a vzorky	- 28 -
3.7	Pilotní zkoušky	- 28 -
3.8	Porovnání s komerčními drátky	- 30 -
3.9	Pull-Out testy.....	- 41 -
3.10	Diskuze výsledků	- 44 -
3.11	Návrh zpracující linky	- 45 -
4	Závěr.....	- 46 -
5	Literatura	- 48 -
6	Seznam obrázků	- 50 -
7	Seznam tabulek	- 51 -

1 Úvod

Odpadní ocelová vlákna vznikají při zpracování zejména použitých výrobků z pryžových hmot. Výztužná ocelová lanka se v technické terminologii nazývají jako „kordy“. Laikovi může toto označení splývat s označením bodné zbraně neboli kordu v šermu, nicméně se takovýto termín používá a z toho názvu vyplývá i řada názvů firem zabývajících se jejich výrobou. Kordové drátky plní v pryžových výrobcích nosnou funkci a omezují jejich deformace.

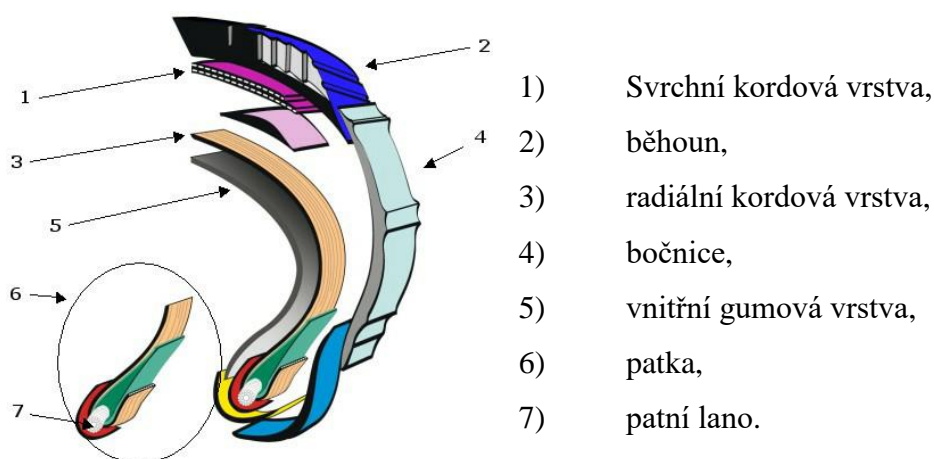
Recyklace pneumatik bude nepochybně nabývat na svém významu jednak z důvodu stále se zvyšující nákladní i osobní dopravy, z důvodů enviromentálních. Výstupními surovinami při recyklaci jsou: pryž, kordy a textilní vlákno. Mimo použití drcené pryže jako palivo pro cementárny, je zapotřebí nacházet další oblasti použití surovin pro jejich efektivnější užitek. To znamená, že surovinám najdeme sekundární použití, které zvýší jejich užitek. Zpracovaný gumový granulát lze použít pro povrchy sportovních areálů, textil jako měkkou přísadu pro povrch jízďáren. Ocelové drátky (kordy) se dosud vozí na opětovnou tavbu ocelového šrotu, bohužel je materiál značně znečištěn a znečišťuje tím i výstupní surovinu. Lepší alternativou se nabízí použití drátků do betonu. Ty se pro použití v betonu primárně nevyrábějí, ale bylo by možné je po jistých úpravách použít. Pokud by se taková úprava zautomatizovala do průmyslového použití, šlo by dokonce o velice levný materiál. Synergie by v takovém případě byla na obou stranách obchodního modelu, a to jak na straně recyklátora jako producenta, který by si významně zvýšil ekonomickou efektivitu z prodeje surovin, tak i betonárny, jako kupující, snížením nákladů na vstupní suroviny. Šlo by tak o oboustranně výhodný model se zlepšením využití odpadní suroviny s enviromentálním přínosem za jistých ekonomických výhod.

Tato varianta využití odpadních ocelových drátků je zapotřebí reálně prozkoumat a stanovit, zdali jde klasická komerční rozptýlená výztuž nahradit těmito drátky a určit jaký má vliv na směs v drátkobetonu s konečnými pevnostmi po 28 dnech a za jakých podmínek či omezení lze tuto výztuž využívat.

2 Současný stav problematiky

2.1 Výztuž v pneumatice

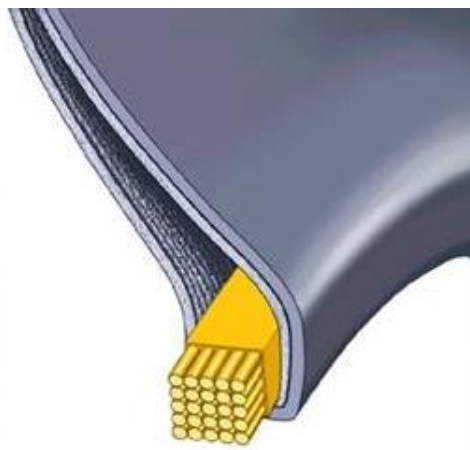
Výztuž v pneumatice slouží jako nosná vložka pryžových výrobků. Ta výrazně ovlivňuje jejich konečné mechanické vlastnosti a kvalitu. Zejména jde o pneumatiky pro jakékoliv použití, pak výrobky typu hadic, dopravníkové pásy, vzduchové měchy, klínové řemeny a další. Ve všech uvedených výrobcích slouží výztuž jako spona, která brání výrobku se po zatížení ať přetlakem vzduchu, valivým odporem či dalším druhem zatížení deformovat. Vláknata jsou uspořádána do struktur, většinou ortogonálních sítí, které jsou kladeny do forem nebo se zapracovávají do ještě nezvulkanizované hmoty. Výztuž se do pneumatiky nejčastěji umísťuje radiálně čili napříč pneumatikou (Obrázek 1). Má to za následek vyšší životnost pneumatiky (8, 9).



Obrázek 1: Konstrukce pláště pneumatiky (17).

Dále jsou v pneumatikách tzv. patní lana (Obrázek 2). Jsou to lana umístěná na kraji pneumatiky, kolem nichž se kordy zakotví. Lana jsou na každé straně pneumatiky a jdou po jejím obvodu. Zpravidla jsou patní lana většího průměru než ocelová kordová vlákna.

Složení pneumatiky je pak následovné, 80 % pryže, 16 % různých vláken, 4 % ocelové kordy (9).



Obrázek 2: Patní lano (17).

2.2 Kordy

Kordy neboli výztuž do kaučukových směsí a obecně pneumatikářského průmyslu se primárně rozumí lanka / drátky z oceli nebo textilní vlákna. V současné době se při výrobě pneumatik pro osobní automobily používá kombinace jak ocelových kordů, tak textilních. Nákladní pneumatiky jsou pak vyztužena plně ocelovými drátky.

Typy textilních vláken:

- polyesterové kordové tkaniny (PET),
- polyamidové kordové tkaniny (NYLON),
- viskóзовé vlákno (RAY),
- aramidové kordové tkaniny,
- PEN tkaniny (16).

Ocelové drátky:

- vysokouhlíkatá ocel (15).

Uvedené textilní materiály jsou na bázi ropných produktů, které jsou z pravidla levnější než ocelové drátky. V takových aplikacích, kde jde pouze o konečné vlastnosti výrobků a nehledí se na jejich cenu, jsou využívány materiály jako aramid, kde při několikanásobném snížení hmotnosti je použit materiál s daleko vyššími materiálovými vlastnostmi. Za použití těchto nejdražších materiálů vznikají ty nejlepší pneumatiky, které jsou pro svou cenu použitelné jen v nejdražších motoristických sportech (16).

2.3 Výroba kordů

Výroba ocelových kordů pro gumárenský průmysl je velmi úzce zaměřená výroba. Co do objemu jde o 3200 tun ocelových vláken jen pro českou potřebu ročně. Tato spotřeba byla kalkulována z dat (Tabulka 1) Produkce odpadních pneumatik v ČR (12). za předpokladu 4 % hmotnostního poměru ocelových drátků v pneumatice z roku 2015 (9).

V České republice jsou minimálně dva výrobci kordových lan a svazků. Jsou jimi firma ŽDB Drátovna a.s. z Bohunína, patřící pod Třinecké Železárny a.s. Dále pak Kordárna plus a.s. z obce Velká nad Veličkou poblíž Uherského Hradiště, která se specializuje pouze na výrobu textilních kordů.

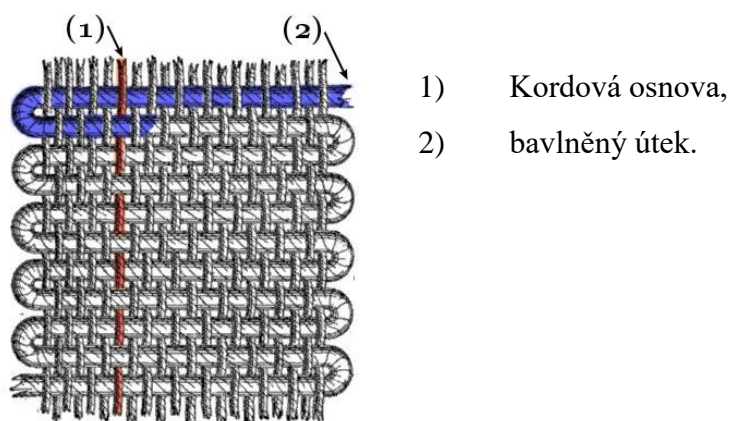
2.4 Ocelové kordy

Průmyslová výroba ocelových drátků je výroba protahováním drátku většího průměru přes trysku neboli průvlaku menšího průměru. Tímto způsobem tažení za studena se z drátu o průměru řádově v mm vyrobí drát o průměru 0,3 mm. Důvod této volby technologie je takový, kdy ve válcovnách oceli jsou schopni za tepla vyválcovat pouze dráty většího průměru. Princip přitom funguje na zachování objemu před i po úpravě tažením. Hotový protažený drát je následně ošetřen mosaznou vrstvou, která zajistí lepší soudržnost s gumovou směsí (11).

Následně se jednotlivá ocelová lanka a dráty zapletou do různých struktur, tak aby tvořili výztužnou síť a aby je bylo možné zapracovat do nezvulkanizované gumové směsi (16).

2.5 Textilní kordy

Jak bylo zmíněno, textilní kordy jsou používány v kombinaci s ocelovými kordy v pneumatikách pro osobní automobily, konkrétně obsahují 5–7 % celkové hmotnosti pneumatiky. Pro aplikaci v méně náročných výrobcích jako gumové pásy, hadice nebo vlnovce jsou použita pouze vlákna textilní. Ještě před vložením vláken do formy a kaučukové směsi, se vlákna spletou do tkaniny (Obrázek 3). Splétání je klasické, kdy se vyrovná osnova a splete se bavlněným útkem (16).



Obrázek 3: Osnova tkaniny (18).

2.6 Množství odpadu

Množství odpadu nejen z pneumatik, ale i dalších průmyslově vyráběných výrobků je pro budoucnost naší planety, jakož i trvale udržitelný rozvoj veliký problém, musíme se jím zabývat a hlavně konat. Konkrétně jen ve státech EU se celkově vyprodukuje 600 000 tun odpadních pneumatik. Trend z posledních let viz (Tabulka 1) je zřetelný, množství odpadních pneumatik neustále přibývá, je to způsobeno stále větší oblibou osobních automobilů a rostoucí silniční dopravě (2).

Tabulka 1: Produkce odpadních pneumatik v ČR (12).

Rok	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Produkce odpadních pneu. [t]	33 167	37 823	62 381	114 177	52 239	62 853	59 499	83 953	83 953	98 234	70 470	77 446	74 789	79 625

Poznámka: rok 2005 produkce nadhodnocena o 47 000 t.

Tento druh odpadu podléhá povinnosti zpětného odběru, který musí zajistit výrobci pneumatik bez ohledu na jejich značku a typ. Výrobci službu musí zajišťovat na své náklady abez nároku na úplatu. V rámci České Republiky funguje kolektivní systém výběru pneumatik, firma ELT Management Company Czech Republic s.r.o., zkráceně (ELTMA), která sdružuje firmy pro výběr pneumatik celorepublikově.

2.7 Možnosti recyklace

Současný stav techniky nám umožňuje několik možností, jak pneumatiky recyklovat, přičemž existují hlavní dvě metody recyklace pneumatik. Metoda protektorování pneumatiku znovu vrátí do oběhu při drobném využití zdrojů jako pryž, elektrická energie, paliva a lidské práce. Ideálním stavem by bylo pouze protektorování, doplněné zpracováním pneumatik nevhodných pro další použití. Touto metodou by byl maximální užitek zdrojů (8).

Další metodou jak pneumatiky a pryžové výrobky recyklovat se zakládá na jejich drcení a zpracování tak, aby výstupem byly dvě hlavní složky, a to ocel a gumový granulát. Ocel se běžně přetaví opět na ocel. Granulát je možné použít několika možnými způsoby jako příměsí různých směsí, gumových stěrek, nebo použít jako izolační prvky. Recyklace pneumatik je téměř bezodpadové hospodářství, kde se pro všechny vzniklé složky najde opětovné využití. Částečně lze za recyklaci uvažovat i spalování hrubé frakce v cementářském průmyslu (8).

2.8 Protektorování

Protektorování pneumatiky je způsob, jakým je možné zvýšit její životnost. Jde asi o nejlepší způsob, jak pneumatiku recyklovat i když je sporné, jestli se jedná přímo o recyklaci, nebo o zvýšení životnosti. Existují přitom hlavní dvě metody protektorování.

Teplé protektorování:

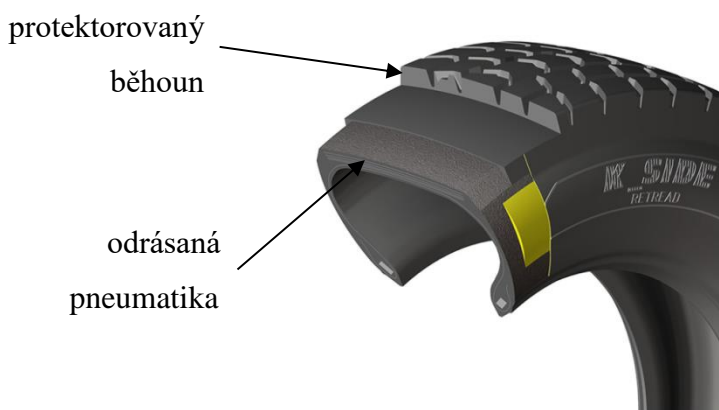
- Pneumatika se odrásá,
- nanesení surové pryže,
- vulkanizace směsi v lisu za tlaku a zvýšené teploty (1,5 MPa, 145 °C) (8).

Studené protektorování:

- Pneumatika se odrásá,
- přiložení předzulkanizovaného běhounu,
- spojení směsí v autoklávu za tlaku a zvýšené teploty (0,5 MPa, 115 °C) (8).

Technologie protektorování je taková, že když je stav pneumatiky vyhovující, a stáří pneumatiky je do 7 let, přistoupí se k odrášení již sjetého pláště. Na tento povrch se nanese nový běhoun a ve vulkanizační komoře nebo lisu se nechá zvulkanizovat. Výsledkem je pneumatika s novým dezénem a vlastnostmi blíží se pneumatice nové, kdy upravená pneumatika je nazývána protektorem (Obrázek 4). Nové vlastnosti protektoru jsou následně zaručeny výrobcem. Protektorování lze pak ještě rozdělit do dvou kategorií, kdy se protekturuje pouze svrchní plášť s dezénem nebo celá pneumatika i s bokem. Taková pneumatika pak vypadá jako zcela nová, na rozdíl od protektorování pouze běhounu, kdy je vidět dělicí linka kde nový plášť přiléhá k novému (8).

Metoda je nejčastěji využívána v nákladní a kamionové přepravě, kdy se výrazněji projeví cenová úspora využití protektoru oproti nové pneumatice. Důvod použití spotřebitelem je spíše ryze ekonomický než ekologický.

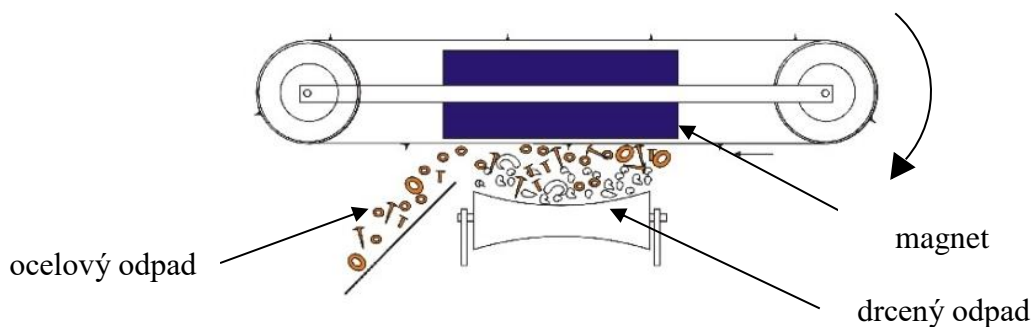


Obrázek 4: Protektorovaná pneumatika (20).

2.9 Drcení

Drcení jako takové může být zařazeno do více způsobů recyklace, záleží však na následném zpracování surovin. Drtící linka vypadá následovně. Při zpracování větších pneumatik, například z nákladních automobilů se nejdříve vytrhne patní lano, které by nadměrně opotřebovávalo řezné nástroje drtiče. Poté se pneumatika dopraví do násypky nožového mlýnu ať s pomocí pásového dopravníku, nebo čelního nakladače. Mlýn pneumatiku namele na tzv. chipsy neboli kusy pneumatiky o různých velikostech. Ty se následně mohou roztrždit na požadované frakce. Pokud jsou jednotlivé chipsy stále velké, opakuje se proces mletí do té doby, než je jemnost namletí dostatečná. Proces sekundárního drcení probíhá v dalším drtiči.

Po tomto kroku nastává separace jednotlivých fází. Na proces separace ocelových drátků se prakticky výhradně používá magnetický separátor. Jedná se o pásový dopravník umístěný nad dopravníkem s drcenými pneumatikami, který se otáčí kolem magnetického jádra viz (Obrázek 5). Existují i jiné metody drcení jako například kryogenní drcení. To má své výhody, avšak pro svou nákladnost se moc nevyužívá. Klasická a nejrozšířenější metoda zpracování je metoda mechanického drcení (8).



Obrázek 5: Magnetický separátor (21).

Následně se roztříděné suroviny čistí od zbytků textilu ofukováním proudem vzduchu. Výsledkem jsou suroviny s určitou čistotou připravené pro další použití. Českým výrobcem drtičů a recyklačních linek na odpadové hospodářství je firma Terier s.r.o. sídlící v severních Čechách, ve městě Chrastava.

2.10 Spalování

V současné době se významným podílem na zpracování pneumatik stává jejich spalování v cementárnách. Pneumatiky se rozdrtí na menší kusy v nožovém mlýně a poté jsou přidávány spolu se vstupními surovinami jako vápenec a dalšími surovinami do rotační pece cementárny. Drcení však není podmínkou, lze spalovat i celé pneumatiky, to však nesplňuje předpoklad homogenity směsi. Nejčastěji se tedy přidávají pneumatiky nadrcené na frakci do rozměru 3 cm. Kusy pneumatik plní dvojí účel, jednak jde o významnou část paliva, tak jde i o zdroj oxidů kovů z kordů a patních lan, které jsou nezbytné při výrobě kvalitního slínku. Spalování probíhá za vysokých teplot až 1450 °C, což je teplota slinutí slínku. Ideálním zdrojem paliva je plyn, který je ekologicky nevhodnější palivo. Bohužel s přihlédnutím na jeho cenu se stává spíš doplňkovým, nebo záložním zdrojem energie. Pneumatiky přitom jako palivo snižují vstupní náklady cementáren, což jim pomáhá k jejich posílení konkurenceschopnosti na vysoce

konkurenčním trhu. Sekundárně jde o efektivní využití odpadu pro výrobu další suroviny, což je enviromentálním pohledem možno hodnotit jako velice příznivé (2).

2.11 Vytříděné drátky

Výsledkem recyklačního procesu linky jsou alespoň částečně separované drátky s různou kvalitou čistoty a délkou. Nastavením linky se dá do jisté míry ovlivnit výsledný stav drátků. V současné době se zpracovatelé pneumatik spokojí jen s takovou kvalitou vytřídění, aby mohli surovinu prodat jako ocelový šrot, který se znovu přetaví na ocel pro další použití. To znamená, že nejsou nuceni příliš dbát na kvalitu vytřídění viz: (Obrázek 6).



Obrázek 6: Hrubě vytříděné drátky

Po nastavení třídící linky pro lepší čistotu drátků je změna znatelná. Drátky neobsahují tolik znečišťujících složek (Obrázek 7).



Obrázek 7: Jemně vytříděné drátky

2.12 Gumový granulát

Primárním výsledkem drcení pneumatik je výroba gumového granulátu. Jde o gumové částice menších rozměrů v řádu milimetrů, které jsou vhodné pro další zpracování. V současnosti se granulát hojně používá jako podkladní materiál fotbalových hřišť, protihlukových stěn typu gabion a dalších, různých dětských prvků zahrad, ale i například jako sorbent ropných produktů. Jako sorbent uvádím komerční produkt SORB-EX kde jde o prášek vzniklý výsledkem drcení (14, 19).

Granulát uveden na obrázku (Obrázek 8) je používán především pro své vlastnosti útlumu, a to jak mechanického, tak i zvukového. Přidáním lepidla do směsi recyklátu vznikne hmota, která se často stěrkuje do jakéhokoliv tvaru a barvy dle požadavku zákazníka. Především jde o stěrky pochůzných ploch zábavních prvků pro děti, které zmírňují riziko úrazu při pádu. Dále jsou vyráběny antivibrační rohože pro omezení přesunu dynamických rázů zejména v kolejové dopravě. Na vzestupu je i použití protihlukových stěn, kdy je do svrchní vrstvy standardních gabionových stěn přidána rohož. Jde o synergický efekt, kdy statickou funkci plní kamenivo a funkci akustickou plní recyklovaná gumová rohož (10, 14)

Jak bylo uvedeno, dalším možným použitím recyklátu je přísada do betonu. Přidáním frakce recyklátu v řádech desetin milimetru má příznivý vliv na provzdušnění betonu a tím zvýšení jeho mrazuvzdornosti (10).

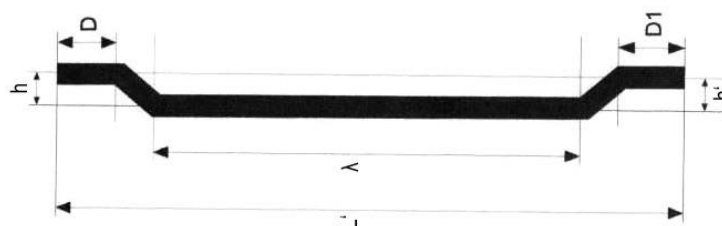


Obrázek 8: Gumový granulát (19).

2.13 Ocelová vlákna do betonu

Drátkobeton jako takový nemá normový základ na kterém by se daly provádět statické výpočty, ale co se týče použití ocelových a polymerních vláken do drátkobetonu, ty už svoji normovou úpravu mají. Norma s označením ČSN EN 14889-1 spravuje jednotné třídy, značení a zejména definuje postup zkoušek včetně kritérií jejich vyhodnocení. To je nezbytné pro objektivní porovnání vlastností drátků napříč výrobci (13).

Pro představení komerčních drátků a jejich označení byly vybrány drátky výrobce Feron a.s. (Obrázek 9). Drátky jsou čisté, bez jakékoliv povrchové úpravy, a proto nejsou vhodné například do venkovního pohledového betonu. Tam je třeba zvážit jejich použití a navrhnout patřičná opatření, třeba použít drátky s povrchovou zinkovou úpravou. Podle informací výrobce lze na vyžádání antikorozi úpravu doplnit. V uvedené tabulce (Tabulka 2) jsou specifikovány hlavní parametry vláken.



Obrázek 9: Ocelový drátek do betonu (22).

Tabulka 2: Parametry ocelových vláken do betonu (22).

Jmenovitý průměr (d)	1,05 mm
Délka drátku (L')	50 mm
Výška ohybu (h, h')	1,8 mm
Úhel ohybu (α, α')	45°
Štíhlostní poměr (λ)	48
Pevnost v tahu (R_m)	1000 MPa

Uvedený typ drátků do betonu je prozatím nejvíce využívaným typem drátku pro použití do betonu. Jeho geometrie je relativně jednoduchá, zároveň výroba je snadná. Kotvení drátku je zajištěno pomocí ohybů na jeho koncích. Z důvodu nedostatečného kotvení existují další typy drátků, které toto kotvení zlepšují dalšími ohyby. Komerčně se tyto úpravy označují například jako 4D a 5D.

Normová úprava zavádí několik základních značek a definic, které byly pro označení použity. Je definováno 5 základních skupin, do kterých se vlákna mají zatřídit pro další zpracování tak, aby bylo možné vystavit prohlášení o shodě (13).

Kde:	I	za studena tažený drát,
	II	vlákna stříhaná z plechu,
	III	vlákna oddělovaná z taveniny,
	IV	vlákna protahovaná z drátu taženého za studena,
	V	vlákna frézovaná z ocelových bloků (13).

2.14 Drátkobeton

Drátkobeton je taková betonová směs, která místo klasické betonářské výztuže používá alternativní způsob prostorového a náhodného rozmístění drátků uvnitř směsi. Jeho použití v betonářském průmyslu je hlavně do podlah, kde odpadá, nebo se alespoň částečně potlačuje nutnost vyztužování klasickou cestou. Dále se metoda využívá v těch částech světa, kde je nákladná lidská práce při vyztužování betonových prefabrikátů a dá se omezit například přidáním většího množství drátků do směsi a v extrémním případě až klasickou konstrukční výztuž nepoužít. Neznamená to, že by drátky jako výztuž nahradily tradiční nosnou výztuž, ale pouze omezily její použití. Drátkobeton nemá jen výhody, ale i nevýhody. Jde například o náhodnost rozmístění drátků ve směsi. Nelze se spolehnout, že v určitém místě prvku je zaručen minimální stupeň vyztužení. Navíc nic nevíme o orientaci drátků, která zásadním způsobem určuje distribuci napětí a tím i odolnost konstrukce vůči zatížení. Protože se nelze spolehnout na tyto zmíněné parametry oproti klasické výztuži, o které máme přehled a jistotu, jedná se o nejvýznamnější důvod proč není drátkobeton využíván v masivnějším měřítku. Dále při použití drátkobetonu na pohledových konstrukcích může výztuž na povrchu „píchat“ a zároveň korodovat. Provádění může být ovlivněno například i tím, že při došlápnutí betonáře na čerstvý beton pro betonáž podlahy může být hydroizolace v krajním případě i propíchnuta. Komerční produkt drátkobetonu je například STEELCRETE pro použití zejména na

průmyslové podlahy či základy. Dávkování ocelových drátků je mezi hodnotami 20 - 30 kg/m³ (3, 5).

Přidáním drátků do betonové směsi se ovlivní zpracovatelnost, což si vyžádá vyšší náročnost na zpracovatelnost, mnohdy se tak zvýší vodní součinitel. Ten lze následně omezit přidáním plastifikátoru. Výsledný přínos přidání ocelových vláken do betonové směsi záleží na množství parametrů jak směsi, tak vlastnostech drátků. Výsledná směs je pak více duktilní (10).

Vliv drátků v betonu je závislý na několika parametrech, a to zejména na materiálových.

Kde: R_m pevnost v tahu (MPa),
 R_e mez kluzu (MPa),
 E_s modulu pružnosti oceli (MPa),
 τ soudržnost beton/ocel (MPa).

Pak i na geometrických vlastnostech.

Kde: L délka drátku (m),
 d průměr drátku (m),
 λ štíhlostní poměr L/\varnothing (-),
 účinnost zakotvení (-).

Vliv drátků ve směsi se projeví až po vzniku trhlin kdy větší modul pružnosti ocelových vláken $E_s \gg E_c$ zachytí vzniklé tahy v konstrukci. Postupem rozevírání trhliny se zvětšuje poměrná deformace drátku a tím vzrůstá jeho vnitřní napjatost. Způsob porušení je možný dvojím způsobem. Buď přetržením drátku po dosažení meze pevnosti nebo vytažením drátku vlivem nedostatečné soudržnosti či nedostatečným kotvením (10).

Kde: E_s modul pružnosti oceli v tahu (MPa),
 E_c modul pružnosti betonu v tahu (MPa).

2.15 Gumobeton

Gumobeton je takový beton, kde se část obsahu kameniva nahradí gumovým recyklovaným granulátem. Může to připomínat obdobu gumosafaltu, používaného u svrchního krytu vozovky, kdy se nahrazením kameniva zvyšuje schopnost akustického útlumu hluku. Přidáním gumového granulátu do betonové směsi se ovlivní její vlastnosti. Jemný granulát s velikostmi maximálně několika mm lze přitom považovat i jako provzdušňující přísadu, která zlepšuje mrazuvzdornost, odolnost proti chemickým látkám. Bohužel je ještě dnes tato příměs oproti konvenčním přísadám ekonomicky nerentabilní (10).

Je logické, že při vyšším dávkování granulátu bude klesat objemová hmotnost betonové směsi a klesat její tlakové pevnosti. Příčinou jsou jiné mechanické vlastnosti gumy oproti nahrazenému kamenivu. Objemová hmotnost gumového granulátu, nebo nasekaných částí gumy se značně liší. Je to z důvodu nehomogenity jak gumové směsi, tak distribuce drátků. Tato objemová hmotnost jistě leží v intervalu od 0,84 do 1,15 g/m³ (6, 10).

V minulosti proběhlo několik výzkumů ohledně vlivu gumové přísady do betonu a následně jeho použití. Vždy se jednalo o výzkum, kdy gumový beton tlumil vibrace, nebo zvuk. Tento materiál by se dal použít do tlumičů vibrací, disipátorů energie, nebo do protihlukových stěn jako doplněk zvukového pohlcovače (6).

2.16 Současné využití odpadních drátků

V současnosti je převážná část produkce odpadních drátků prodávána firmám, zabývajícím se výkupem ocelového šrotu. Drátky se spolu s ostatním ocelovým šrotem roztaví v obloukových pecích a znovu tak vznikne surovina vhodná pro jakékoliv další použití. Výkupny ocelového šrotu však tento vstupní materiál z drátků neradi vykupují. Důvodem je obsah množství znečišťujících složek jako guma a textil. Podíly složek jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 5). Složky pak mají negativní vliv na čistotu spalin a kvalitu ocelové taveniny. To zvyšuje náklady na úpravu směsi.

Výkupní cena drátků se pro zpracovatele pneumatik pohybuje okolo 75 Kč za tunu. Přitom výkupní cena běžné oceli se ve sběrnách kovů pohybuje v intervalu 3000 až 4000 Kč za tunu, cena je dále samozřejmě ovlivněná zmíněnou čistotou a druhem výrobku (14).

3 Praktická část

Na základě informací od firmy Montstav s.r.o. bylo zjištěno, že při zpracování odpadních pneumatik vzniká množství ocelového odpadu z drátků, pro které zatím neexistuje sekundární použití tak jako u pryžové drtě. Je třeba najít pro tento materiál využití, aby byla dosažena úspora primárních surovin. To bylo impulzem pro další zkoumání, jak by se tento odpadní materiál mohl využívat. Nejlepší použití se jevílo jako ocelová výztuž do betonu, kde by ocelové odpadní drátky mohly nahradit drátky průmyslově vyrobené. Předpoklad byl samozřejmě takový, že pokud budou mít tyto drátky příznivý vliv na tahové a tlakové pevnosti betonu bylo by to bráno jako úspěch. Ani zdaleka se nepožadovalo, aby odpadní drátky zlepšovaly vlastnosti betonu natolik, jako drátky průmyslově vyráběné. Předpoklad byl takový, kdy použitím odpadního materiálu zlepšíme vlastnosti materiálu jiného s drobnými negativními vlastnostmi, které lze snadno potlačit.

Mnoho projektů s cílem zmírnit enviromentální zátěž pro životní prostředí má bezesporu podporu politickou i sociální. Bohužel tato podpora nestačí a je nezbytné, aby každý projekt měl jak enviromentální, tak i jistý ekonomický význam. Jde o jakési synergie, které jsou nezbytné, neboť světem vládne ekonomické prostředí. Tento projekt na opětovné využití odpadních drátků pro potřeby stavebnictví do betonu obě výhody má, a tak je velice pravděpodobné ho prosadit do širšího povědomí realizátorů staveb a betonáren tak, aby drátky byly hojně používány (5).

3.1 Materiálové vlastnosti ocelových kordů

Na základě domluvy s firmou ŽDB Bohumín, výrobcem ocelových kordů do pneumatik byla poskytnuta tabulka (Tabulka 3) s parametry ocelových spletců, uvedená tabulka však obsahuje jen část poskytnutých dat, ze kterých je možné přepočítat některé vlastnosti. Bohužel materiálové vlastnosti primárních drátků poskytnuty nebyly z důvodu ochrany firemního know - how. Z uvedeného označení 2x 0,3 NT nebo HT jde o drátky ze dvou spletených lanek průměru 0,3 mm. Označení NT či HT rozděluje pevnostní vlastnosti na 2 kategorie. Uvedené hodnoty jsou střední hodnoty rozsahu.

Tabulka 3: Produktová specifikace ocelových kordů firmy ŽDB Bohumín (15).

Vlastnosti	jednotky	2 x 0,30 NT			2 x 0,30 HT		
		min.	stř.	max.	min.	stř.	max.
Síla přetržení	N	365	400	435	405	445	485
Průměr	mm	0,57	0,6	0,63	0,57	0,6	0,63
Délková hmotnost	g/100 m	104	112	120	104	112	120
Hmotnost mosazi	g/kg	2,5	3,4	4,3	2,5	3,4	4,3
Obsah mědi	%	61,0	63,5	66,0	61,0	63,5	66,0
Obsah zinku	%	34,0	36,5	39,0	34,0	36,5	39,0

Rovnice 1: Výpočet meze pevnosti drátků.

$$R_m = \frac{F_{std.}}{2A_f} \quad 1.$$

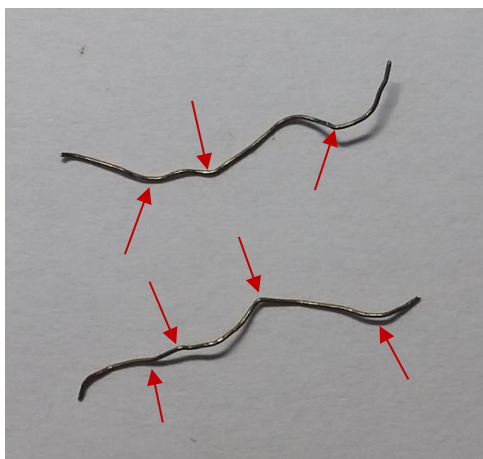
Kde: R_m mez pevnosti (Pa),
 F_{std} střední síla na mezi přetržení, breaking force (N),
 A_f průřezová plocha jednoho drátku (m^2).

Ze vztahu (Rovnice 1) a specifik výrobce (Tabulka 3) byla zpětně vypočtena mez pevnosti ocelových kordů v tahu R_m uvedené v tabulce (Tabulka 4). Vypočtené meze pevnosti jsou zaokrouhleny na celé MPa, kde NT kord vykazuje pevnost $R_{m,NT} = 2829$ MPa a kord označení HT vykazuje pevnost $R_{m,HT} = 3148$ MPa. Co se týče typu oceli pro použití v kordech, nejbližší se svým chováním blíží oceli pružinové, materiálová norma ČSN 14 260.

Tabulka 4: Mez pevnosti ocelových kordů (15).

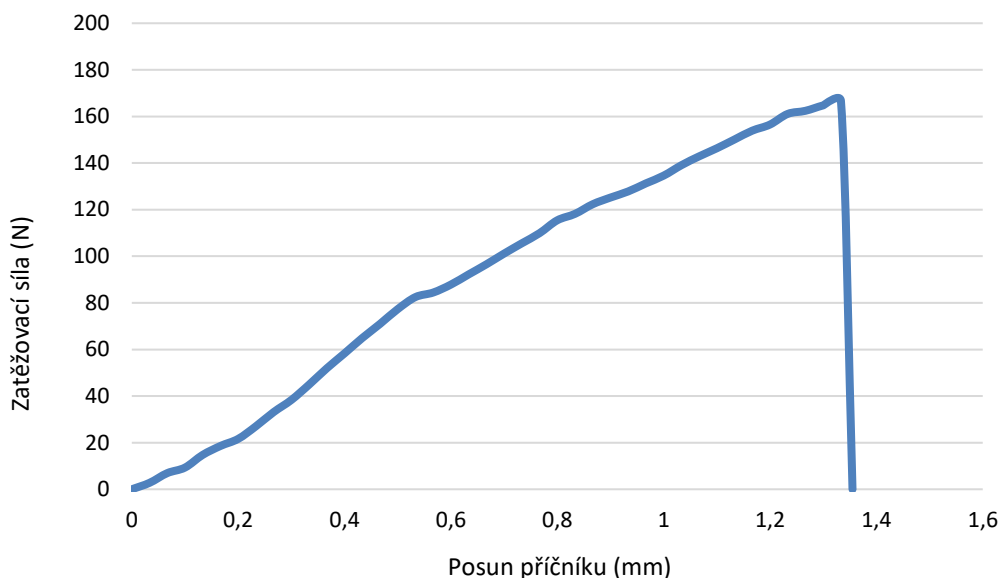
Pevnosti	Jednotky	2 x 0,30 NT	2 x 0,30 HT
$F_{std.}$	N	400	445
A_f	mm ²	$7,06 \times 10^{-2}$	$7,06 \times 10^{-2}$
$R_{m,min.}$	MPa	2582	2865
$R_{m,stř.}$	MPa	2829	3148
$R_{m,max.}$	MPa	3077	3431

Pro ověření správnosti úvahy a výsledků byla provedena „pull-out“ zkouška na zkušebním standu. Drátek byl po upevnění do čelistí zatěžován tahovou silou až do jeho vytažení nebo přetržení. Výsledkem byl pracovní diagram zkoušky (Obrázek 11), případně síla na mezi přetržení F . Na uvedeném diagramu jsou vidět zvlněné části grafu, kde se zkoušené vlákno během zkoušky postupně dopínalo. Zkouška byla vždy ukončena přetrhnutím drátku, nejčastěji v jeho slabém místě, jak je vyznačeno na obrázku (Obrázek 10). Tím je myšlen ohyb drátku vzniklý mechanickou recyklací od nožů drtiče. V ohybu se lokálně dosáhne meze kluzu materiálu a místo je tak negativně ovlivněno. Výsledek trhací zkoušky je tímto ovlivněn a zejména z tohoto důvodu není dosaženo stejných pevností jako u dat poskytnutých výrobcem. Chování drátků při trhací zkoušce je však značně odlišné od chování drátku v betonu. Při trhací zkoušce se drátek v ohybu postupně narovná a tím přidává další namáhání do materiálu. To se v betonu velice eliminuje, neboť drátek v betonu má definovaný tvar.



Obrázek 10: Oslabená místa drátků.

Z uvedených parametrů a předpokladu průměru drátku na hodnotě $d = 0,3$ mm byla vypočtena střední hodnota meze pevnosti na $R_m = 2687$ MPa. Jak již bylo uvedeno, hodnota je nižší z důvodu částečného poškození drátku. Dalším důvodem je neznalost použitého typu drátku v případě drátků výrobce ŽDB Bohumín typy NT a HT.



Obrázek 11: Pracovní diagram trhací zkoušky drátku.

3.2 Čistota vytríděné suroviny

Jak je uvedeno na obrázcích (Obrázek 6 a Obrázek 7), kvalita vytríděného materiálu je také nestálým parametrem. Z důvodu malé výkupní ceny ocelového recyklátu není výrobce motivován výrazně zlepšovat jeho čistotu. Ocelové drátky jsou znečištěny zejména dvěma základními složkami. Jsou to zbytky pryžových částíček, které jsou buď unášeny spolu s drátky pomocí magnetického separátoru, nebo jsou přímo navulkanizované na drátcích. Další znečišťující složkou jsou textilie, které v surovině značně zvyšují prašnost. Ačkoliv jsou uvedené složky označené jako složky znečišťující, primárně v betonové směsi nevadí. Vadí nám pouze nepřímo, kdy zvyšují vodonáročnost směsi pro zachování stejné zpracovatelnosti a provzdušňují směs, čím snižují její objemovou hmotnost i finální mechanické parametry.

Pro zjištění obsahu znečišťujících složek v surovině byla provedena zkouška. Výsledky jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 5). Zkouška obsahuje 2 vstupní suroviny, a to frakci separovanou přes síto o velikosti oka 20 mm a frakci označovanou jako čisté drátky, která byla ručně vytríděna znečišťujících složek textilu.

Tabulka 5: Hmotnostní podíl složek v surovině.

	Separace, síto 20 mm	Čisté drátky
Podíl drátků (%)	29,0	95,0
Podíl pryže (%)	36,7	5,0
Podíl textilií (%)	34,3	0,0

3.3 Shluky drátků

Přidáním surových drátků bez úpravy do betonové směsi se výrazně zhorší její zpracovatelnost. Zhoršením je myšlena vyšší náročnost směsi na vodu pro zachování stejné zpracovatelnosti. To je přitom nejmenší problém, který je snadno řešitelný. Řešení se nabízí přidáním vody či zvýšením množství plastifikátoru. Hlavní problém jsou vlastnosti drátků, které jsou po semletí značně pokřiveny a zprohýbány. Pokřivení drátků tvoří na jejich délce různé háčky a očka, které se mezi sebou proplétají a vytvoří tak špatně rozdružitelný shluk drátků.

Shluk se vytvoří z většího množství drátků při manipulaci v suchém stavu, avšak i při přípravě směsi. To je přitom největší problém při přípravě drátkobetonu s odpadními drátky z pneumatik. Suchý shluk drátků lze rozdružit buď manuálně, nebo na vibrační stoličce. To však není řešením konečným, neboť při dalším zpracování se shluky opět vytvoří. Na obrázku (Obrázek 12) můžeme vidět přípravu betonové směsi neupravených odpadních drátků v míchačce. Pro lepší rozmísení drátků ve směsi byly nejprve míchány pouze s kamenivem. Jak je z obrázku patrné, i přes to jsou ve směsi shluky drátků. Ty jsou na obrázku (Obrázek 12) označeny červenými kroužky. Část drátků mimo zmíněných shluků byla rovnoměrně rozmísená ve směsi. Při betonáži vzorků byly tyto shluky odejmuty tak, aby zkušební tělesa jimi nebyla ovlivněna.



Obrázek 12: Příprava směsi drátkobetonu se shluky drátků.

3.4 Geometrická analýza a měření vstupů

Geometrická analýza dat nám umožní další práci s drátky, jako například numerickou separaci vzorků na sítěch. Pro geometrickou analýzu byl odebrán referenční vzorek o 400 kusech surových drátků. Znečišťující složky přitom do měření nebyly zahrnuty, neboť jde o výběr žádoucího materiálu a v betonu nám příliš nevadí. Na každém vzorku tak bylo změřeno několik charakteristických hodnot, které byly dále zpracovány.

Rovnice 2: Výpočet indexu křivosti drátků CI (1).

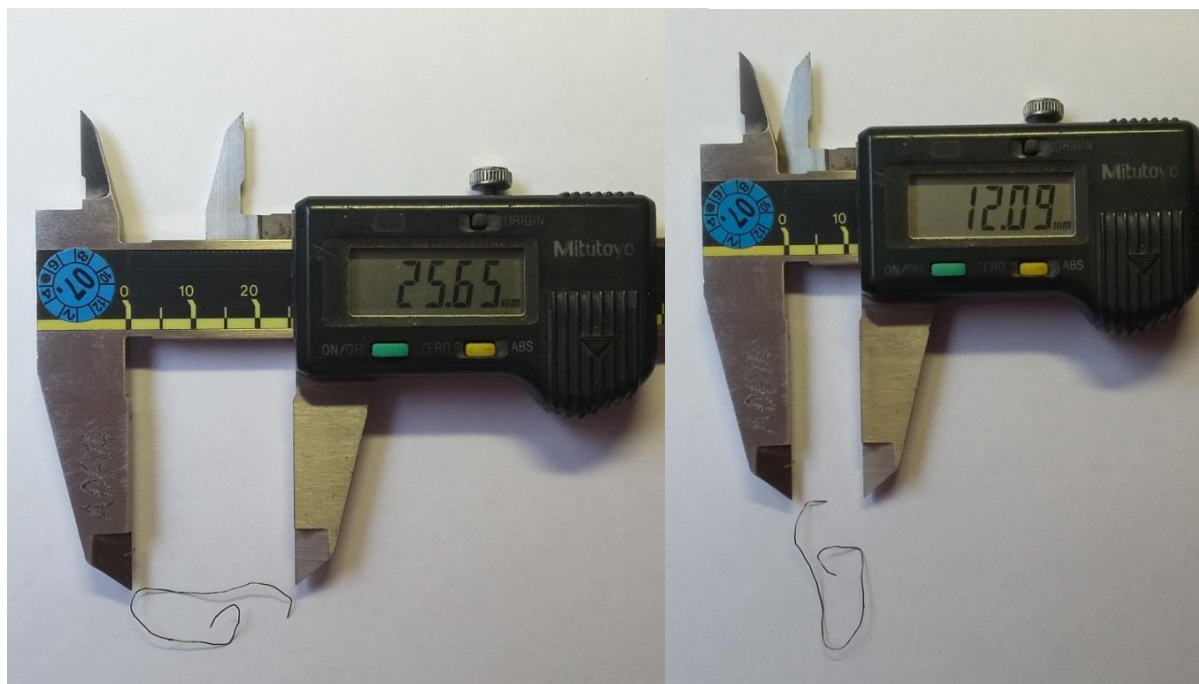
$$CI = \frac{l_d - l_f}{l_d} \quad 2.$$

Rovnice 3: Výpočet štíhlosti drátku λ .

$$\lambda = \frac{l_d}{d_f} \quad 3.$$

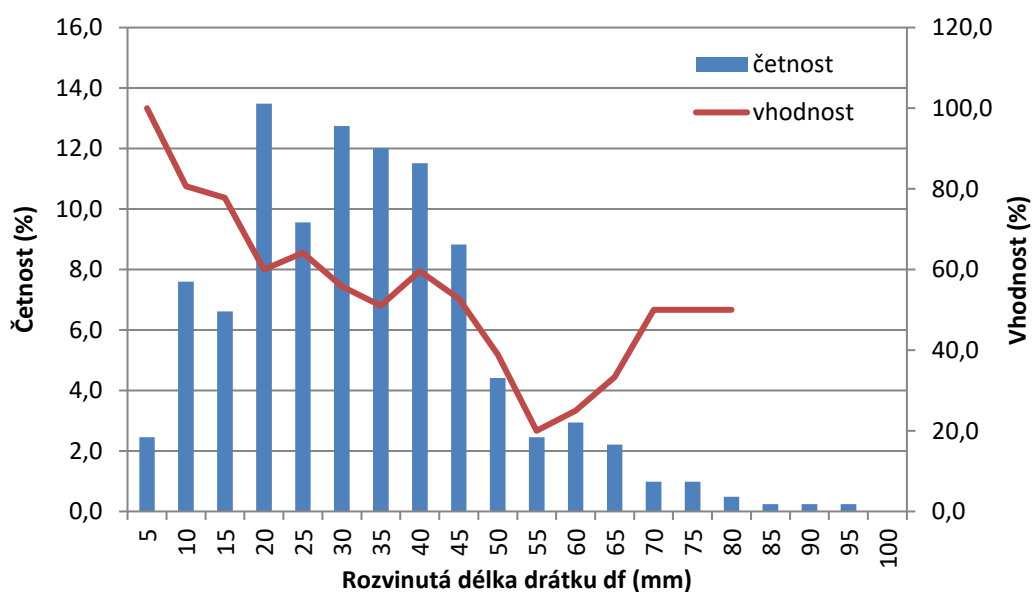
Kde:	d_f	průměr drátku (mm),
	l_f	nejdelší rozměr drátku (mm),
	w_f	kolmá vzdálenost drátku (mm),
	l_d	rozvinutá délka drátku (mm),
	CI	index křivosti (-),
	λ	štíhlost drátku (-),
	v	vhodnost (-) (1).

Na obrázku (Obrázek 13) je předvedeno měření nejdelšího rozměru drátku l_f a kolmé vzdálenosti drátku w_f . Následně byl drátek rozvinut do své maximální délky a změřen rozměr l_d . Průměr drátků se až na výjimky prakticky nelišil. Výjimky tvořily drátky z patních nebo pneu drátů, které mají výrazně větší průměr $d_f = 1,0$ mm než drátky běžné o průměru $d_f = 0,3$ mm. Patní lana a pneu dráty jsou výrazně ohybově tužší než kordové drátky. Zcela zásadní vlastností drátků, která ovlivňuje zpracovatelnost je označena vhodnost drátku v . Ta udává, zda je drátek náchylný k cuchání a tvoření shluků drátků. Vhodnost byla stanovena tak, že drátek nesmí obsahovat po své délce veliké lokální křivosti, tím se myslí, že drátek nesmí obsahovat očka, háčky a jiné nevhodné geometrické tvary. Na obrázku (Obrázek 13) je vidět drátek, který je označen jako nevhodný.



Obrázek 13: Měření geometrie drátku.

Pro rozdělení délek drátků v sadě vzorků byl zpracován histogram četností (Obrázek 14). Z něj je zřejmé, že nejvíce obsažené délky drátků jsou od 20 do 45 mm. Následně jako nejmenší vhodné drátky jsou v oblasti celkové délky drátku 50-55 mm. Při dalším zpracování drátky by tak bylo vhodné zaměřit se na eliminaci nevhodných tvarů v uvedené oblasti. Pro drátky delší jak 80 mm není vhodnost uvedená z důvodu malé četnosti a z toho vyplývající velká nejistota výsledku měření vhodnosti.

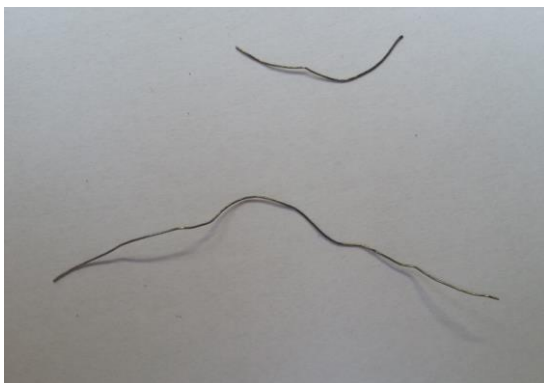


Obrázek 14: Histogram četností surových drátků.

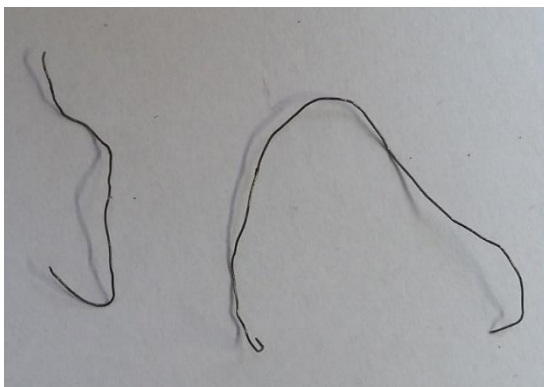
Tabulka 6: Střední geometrické vlastnosti surových drátků.

d_f	0,3 mm
l_d	31 mm
λ	102
CI	26 %
v	58 %

Uvedené parametry (Tabulka 6) vzorku drátků jsou zpracovány a charakterizovány svou střední hodnotou. Na základě zpracovaných parametrů je zřejmé, že při průměrné délce, štíhlostního poměru a indexu křivosti by se jednalo o vhodné drátky pro vyztužení některých betonových směsí. Bohužel se tak nejedná, a to z důvodu malého zastoupení vhodného tvaru drátků uvedené na obrázku (Obrázek 16). Tvar ukončení drátků je z nožového mlýna často zakončen zahnutím s otřepy, které způsobuje shlukování drátků do sebe. To se neděje u drátků s vhodným tvarem jako jsou uvedené na obrázku (Obrázek 15).



Obrázek 15: Vhodné drátky.



Obrázek 16: Nevhodné drátky.

3.5 Třídění drátků

Způsob, kterým je možné drátky vytřídit a zlepšit tak jejich chování je možnost prosetí na vibračních sítích a kontrolovat způsob, jak se nám při různých velikostích ok síta mění kvalita, vhodnost, křivost a délky drátků. Na základě analýzy histogramu četnosti surových drátků (Obrázek 14) je předpoklad takový, že nadsítná frakce bude mít pravděpodobně větší obsah vhodných drátků a drátků menší délky. Z prosévací zkoušky nám zbyde nadsítná frakce, která by měla lepší vlastnosti a zpracovatelnost než frakce podsítná.

Prosévací zkouškou se nemyslí přímo reálný experiment, ale numerické zpracování dat ze změřeného vzorku. Otvor síta je uvažován jako kruhový a jelikož je rozměr w_f vždy nejmenším rozměrem drátku je porovnáván, zda drátek bude na podsítné nebo nadsítné frakci.

Rovnice 4: Podmínka nadsítné frakce.

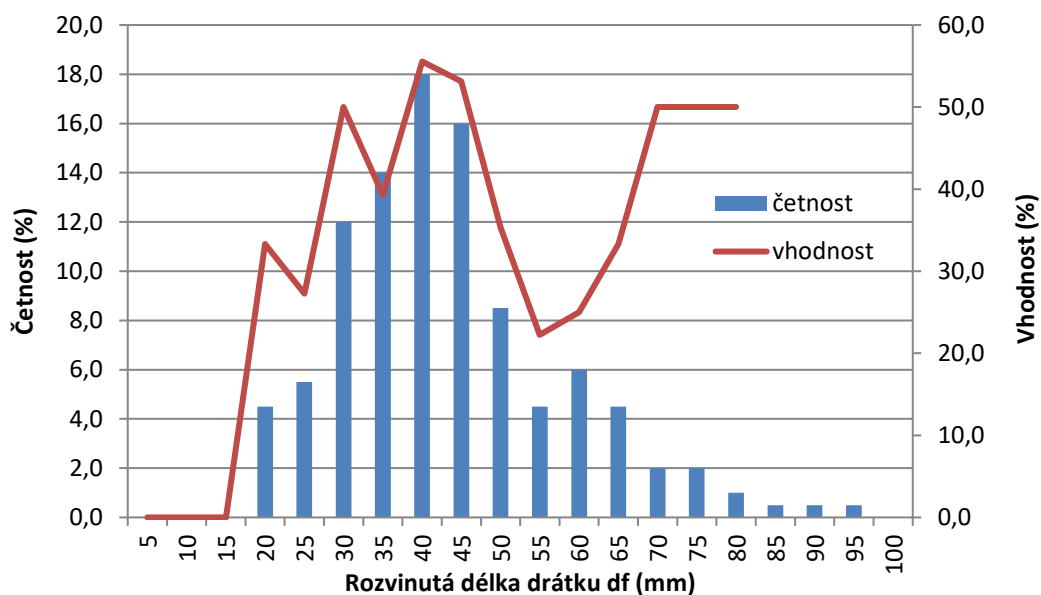
$$w_f < \varnothing_{S1} \quad 4.$$

Kde: \varnothing_{S1} průměr síta (mm).

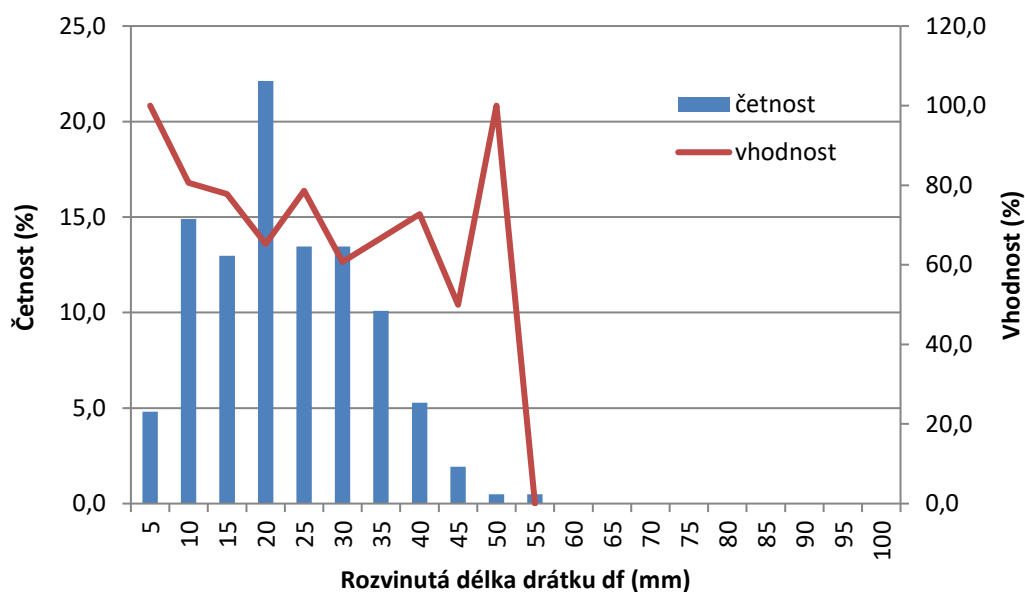
Uvedená rovnice (Rovnice 4) přitom nebyla jedinou omezující podmínkou. Další podmínkou byla minimální výtěžnost 50 % ze vstupního materiálu a velikost oka síta byla zaokrouhlena na celé milimetry. Pomocí programu MS Excel a funkce Řešitel bylo nalezeno optimální řešení, které bylo zaokrouhleno na celé milimetry. Výsledkem je průměr oka síta \varnothing_{S1} 6 mm, pro které byly vypracovány histogramy četností nadsítné a podsítné frakce. Frakce nadsítná byla přitom pracovně označena jako NAD1 a analogicky frakce podsítná POD1. Nutno dodat, že byly uvažovány otvory ve tvaru kružnice nikoliv otvory čtvercové, jaké jsou použity při prosévací zkoušce kameniva. Důvodem jsou konstantní vzdálenosti průměru kružnice oproti různé vzdálenosti například úhlopříčky a strany čtverce.

Tabulka 7: Střední geometrické nadsítné a podsítné frakce surových drátků.

	NAD1	POD1
d_f	0,3 mm	0,3 mm
l_d	41 mm	21 mm
λ	138	69
CI	35 %	17 %
ν	44 %	72 %



Obrázek 17: Histogram četností nadsítné frakce NAD1.



Obrázek 18: Histogram četností podsítné frakce POD1.

Z uvedené tabulky (Tabulka 7) a obrázku (Obrázek 18) je zřejmé, že frakce NAD1 vykazuje větší množství vhodných drátků pro další zpracování než neupravené surové drátky. Vhodnost největšího zastoupení délek drátků v rozsahu 0-35 mm mají vhodnost více jak 50 %, celkově je pak vhodných 72 % vzorků. To je zlepšení o 14 % poměrového obsahu oproti vstupnímu materiálu. Nadsítná frakce by se pak musela dále zpracovat, nebo pro ni najít jiné vhodné využití. I přes takto zlepšený poměr vhodných drátků by bylo vhodné provést experiment a zjistit reálné

chování proseté frakce. Nepochybně se zpracovatelnost zlepší, je však otázkou o kolik a zda to docílí potřebnou míru zpracovatelnosti a rozprostření drátků v betonové směsi.

Jako další způsob eliminace nevhodných drátků se jevílo přidat do prosévací zkoušky další síto. Bohužel z grafu (Obrázek 18) je zřetelné, že spodním omezením frakce se vhodnost nezlepší, a tak by tato metoda postrádala účel.

3.6 Použité materiály, směs a vzorky

Pro potřebu výroby betonových vzorků byla použita základní směs označená jako A, která byla během testování mírně modifikována. Základními surovinami jsou kamenivo, cement, mikrosilika, plastifikátor, voda a drátky. Kamenivo frakce 0-4 mm je ze Šterkovny Dobříň, dále frakce 4-8 mm a 8-16 mm je z Lomu Sýkořice. Použitý cement je portlandský CEM I 42,5 R z cementárny Mokrá. Jako plastifikační přísada byl použit plastifikátor na bázi polykarboxylátů, obchodní označení Stachement 2000 od firmy Stachema. Jako příměs do betonové směsi byla přidána mikrosilika s obchodním označením Stachesil, též od firmy Stachema. Dále je použita voda pitná, z vodovodního řádu.

Tuhnutí a tvrdnutí betonových vzorků probíhalo na vzduchu za běžných pokojových teplot a vlhkostí. Vzorky nebyly během této fáze nijak ošetřovány, ani přikryty. Veškeré zkoušky byly provedeny po 28 dnech. Pro zkoušky se použily normované zkušební trávce o průřezu 100 x 100 mm, délky 400 mm a krychle o hraně 150 mm. Menší trávce by pro zkoušku byly nevhodné, a to z důvodu velikosti největších frakcí kameniva, a zejména největších délek drátků, které zásadně měnily zpracovatelnost.

3.7 Pilotní zkoušky

Pro potřeby ověření vhodnosti odpadních drátků a jejich vlivu na pevnosti drátkobetonů byla použita prvotní směs A0. Pro zkoušky vlivu drátků na pevnosti betonu jak v tlaku, tahu za ohybu a příčném tahu se zhotovily dvě zkušební sady po třech kusech. Test byl navrhnut jako porovnání mezi odpadními drátky a drátky komerčními. Komerční drátky jsou myšleny též odpadní drátky vzniklé z plechů, které byly nastříhány na proužky a profilovány pro lepší kotvení v betonu. S ohledem na použití odpadních drátků v obou směsích byly očekávány obdobné výsledky. Návrh směsi s hmotnostním dávkováním je uveden v tabulce (Tabulka 8). Směs byla volena tak, aby v ní byl větší podíl jemnější frakce z důvodu použití malých a tenkých drátků.

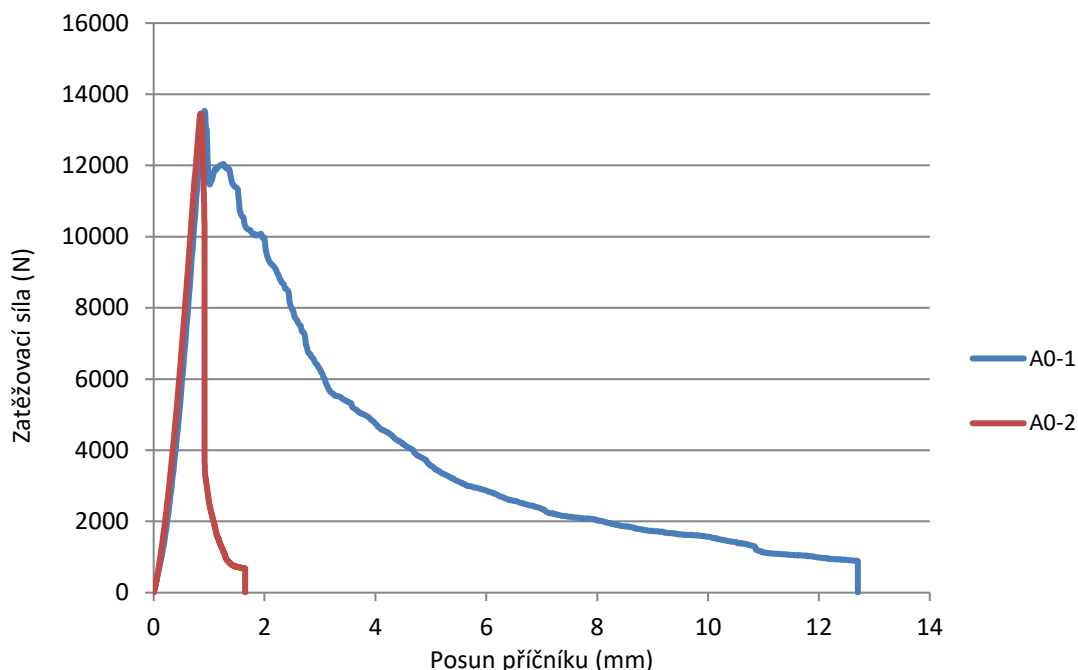
Tabulka 8: Prvotní směs porovnávací.

Složky		A 0-1	A 0-2
Dávkování		(kg/m ³)	(kg/m ³)
Kamenivo	0-4 mm Dobříň	1020	1020
	4-8 mm Sýkořice	280	280
	8-16 mm Sýkořice	600	600
Cement	CEM I 42,5R	350	350
Plastifikátor	Stachement 2000	3,2	3,2
Voda	pitná	174	174
Drátky	čisté drátky z recyklace Ø 0,3 mm	50	-
	komerční drátky délky 25 mm, Ø 0,4 mm	0	50

Výsledky zkoušek směsí byly zpracovány a uvedeny v tabulce (Tabulka 9). Zpracovány jsou dle kritérií a postupu uvedeného v další části diplomové práce Kap. 3.8. Z výsledků uvedených v tabulce (Tabulka 9) není zřejmé jaký mají přidané drátky vliv na konečné pevnostní charakteristiky. Co ale zřejmé je, že dle zmíněných pevnostních parametrů se drátky z odpadních vláken plně vyrovnají drátkům komerčním. Navíc směs z odpadních drátků A0-1 vykazovala několikanásobně lepší vlastnosti v pohlcené energii než drátky komerční. To ukazuje na její zvýšenou duktilitu, která je patrná na grafu (Obrázek 19) znázorňující zkoušku tříbodovým ohybem. Je zřejmé, že maximální zatěžovací síla je prakticky totožná, nástupní větev diagramu je též totožná, však větev sestupná vykazuje naprosto jiné chování. Směs s komerčními drátky má charakter porušení obdobné křehkému lomu jako u prostého betonu, oproti tomu směs s odpadními drátky má sestupnou větev protáhlou. Nosná konstrukce by v případě porušení před kolapsem varovala.

Tabulka 9: Výsledky pevností pilotních vzorků.

Směs:	A0-1	A0-2
Objemová hmotnost (kg/m ³)	2306	2311
Pevnost v tlaku (MPa)	60,1	59,0
Pevnost v příčném tahu (MPa)	4,0	4,2
Pevnost v tahu ohybem (MPa)	6,0	6,5
Pohlcená energie (kJ/m ²)	4,0	0,8



Obrázek 19: Pracovní diagram pilotní směsi.

3.8 Porovnání s komerčními drátky

Na základě pozitivního výsledku předchozí směsi A0-1 bylo přistoupeno k dalším zkouškám. Pro zkoušky porovnání vlastností surových drátků s ostatními drátky komerčně dostupnými, byly zhotoveny zkušební vzorky trámů normalizovaného rozměru 100 x 100 x 400 mm. Základem byla směs A, do které se dávkovalo stejné množství drátků od různých výrobců. Dávkování bylo nastaveno na 50 Kg/m³ což odpovídá 2,1 % hmotnosti směsi. Celkem bylo zhotoveno 5 směsí, přičemž první směs byla směsí referenční bez jakékoliv výztuže. Další jsou označeny římskými číslicemi I až IV. Pracovně jsou drátky označeny délkou, průměrem a dalšími zkratkami.

Kde: *VP* vysokopevnostní,
KU kotevní úprava,
PU povrchová úprava,
OC ocel běžná.

Tabulka 10: Směsi komerčních drátků.

Složky		A	I	II	III	IV
Dávkování		(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)
Kamenivo	0-4 mm Dobříň	980	980	980	980	980
	4-8 mm Sýkořice	210	210	210	210	210
	8-16 mm Sýkořice	480	480	480	480	480
Cement	CEM I 42,5R	400	400	400	400	400
Mikrosilika	Stachesil	35	35	35	35	35
Plastifikátor	Stachement 2000	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Voda	pitná	180	180	180	180	180
Drátky	referenční směs	0	-	-	-	-
	VP, KU, PU, 60 mm, Ø 0,75 mm	-	50	-	-	-
	VP, KU, PU, 30 mm, Ø 0,75 mm	-	-	50	-	-
	VP, KU, PU, 25 mm, Ø 0,4 mm	-	-	-	50	-
	OC, KU, 40 mm, Ø 0,8 mm	-	-	-	-	50

Na základě takto vytvořených vzorků bylo umožněno stanovení jednotlivých pevností a objemové hmotnosti. Nejprve byla pro každý trámec ve směsi vypočtená objemová hmotnost dle vzorce (Rovnice 5). Následně je do tabulky (Tabulka 11) zaznamenána průměrná objemová hmotnost každé směsi.

Rovnice 5: Výpočet objemová hmotnosti

$$\rho_i = \frac{m_i}{V_i} \quad 5.$$

Kde: m_i hmotnost trámce (kg),
 V_i objem trámce (m³).

Hlavním parametrem pevnosti a chování ztvrdlého betonu je pevnost v tlaku. Díky této veličině se relativně snadno dorozumí i laik s technikem, kdy si objednáva tzv. „dvacítku“ na základy. Technik pak ví, že jde o krychelnou pevnost v MPa, následně jde o pevnostní třídu betonu označenou jako C 16/20. Značení uvádí, že jde o C jako značka betonu (anglicky concrete). První dvojčíslí pak představuje pevnost v tlaku v MPa válcové pevnosti na zkušebním tělese válce o průměru 150 mm a výšky 300 mm, dále druhé dvojčíslí uvádí opět

pevnost v tlaku v MPa uváděnou jako pevnost krychelnou, měřenou na tělese ve tvaru krychle o hraně 150 mm.

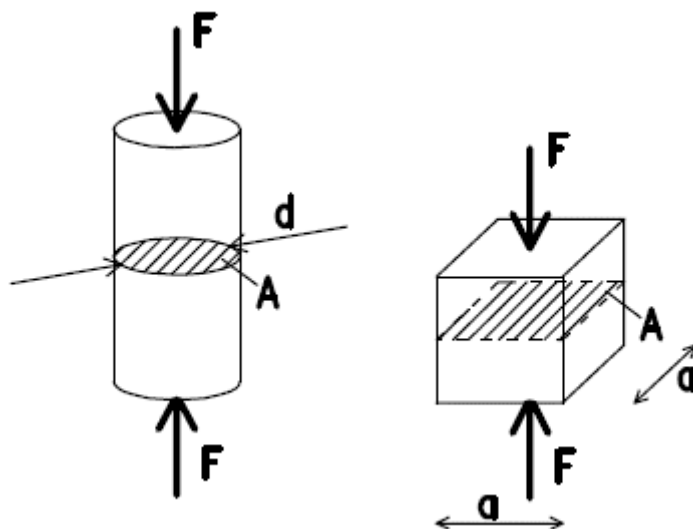
Neznamená však, že výsledná pevnost ze zkoušky pevnosti v tlaku vzorku je zároveň i hodnota pro zařazení do pevnostních tříd. Zařazení je proces vyžadující statistickou analýzu dat, kde číslo pevnostní třídy označuje minimální zaručenou hodnotu. Rozdělení je spravováno normou ČSN EN 206-1.

Pro náš případ neuvažujeme o zařazení směsi do pevnostních tříd, a tak se spokojíme pouze s průměrnou hodnotou pevnosti. V našem případě měřená pevnost v tlaku je vypočtená krychelná pevnost dle vzorce (Rovnice 6). Schéma zkoušky je vyobrazená na obrázku (Obrázek 20). Výsledky průměrné pevnosti v tlaku v MPa jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 11).

Rovnice 6: Vzorec pro výpočet pevnosti krychelné pevnosti v tlaku.

$$f_{ck} = \frac{F_{max}}{A} \quad 6.$$

Kde: f_{ck} krychelná pevnost v tlaku (Pa),
 F_{max} maximální hodnota zatěžovací síly (N),
 A plocha styku betonu a čelistí lisu (m^2).



Obrázek 20: Uspořádání zkoušky pevnosti v tlaku.

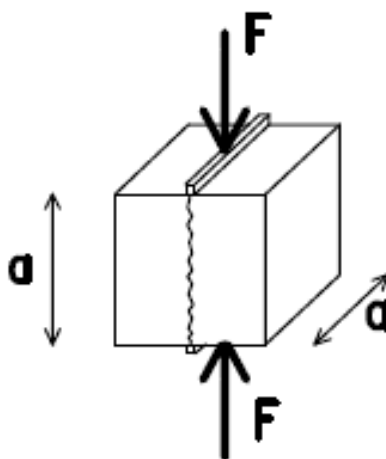
Další zkouškou pro stanovení charakteristických pevností betonu je zkouška pevnosti v příčném tahu dle rovnice (Rovnice 7) vyobrazena na schématickém obrázku (Obrázek 21). V případě, kdy se rozměry zkoušeného tělesa liší s normovanými rozměry, uvažují se skutečné

rozměry vzorku. Vypočtené výsledky průměrné pevnosti v příčném tahu pro každou směs jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 11).

Rovnice 7: Vzorec pro výpočet pevnosti v příčném tahu.

$$f_{ct} = \frac{2 F}{\pi L d} \quad 7.$$

Kde: f_{ct} pevnost v příčném tahu (Pa),
 F maximální zatížení (N),
 L délka dotyku tělesa s kontaktními deskami (m),
 d příčný rozměr tělesa (m).



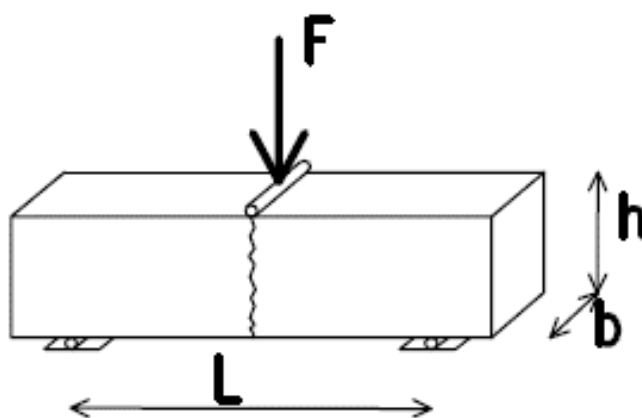
Obrázek 21: Uspořádání zkoušky pevnosti v příčném tahu.

Měření tahových vlastností betonu a pevnostních charakteristik ztvrdlého betonu je pevnost v tahu ohybem. Je to zkouška, kdy přímo měříme zatěžovací sílu a nepřímo dopočteme jinou veličinu, tedy pevnost v tahu ohybem. Nutno dodat, že přitom nejde o přímo tahovou pevnost betonu, ale o pevnost, která se svou velikostí shoduje do desítek procent s pevností v prostém tahu. Pevnost v tahu ohybem je možno provádět při dvou standardizovaných uspořádáních. První z nich je tzv. tříbodová zkouška (Obrázek 22), která je použita na vyhodnocení experimentu. Druhou je čtyřbodová zkouška, která je dokonalejší hlavně z důvodu eliminace vlivu posouvající síly. Výsledná pevnost se vypočte z maximální zatěžovací síly uvedené v pracovním diagramu zkoušky pomocí vzorce (Rovnice 8). Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 11).

Rovnice 8: Vzorec pro výpočet pevnosti v tahu ohybem pro tříbodový ohyb.

$$f_{cf} = \frac{3}{2} \times \frac{FL}{bh^2} \quad 8.$$

Kde: f_{cf} pevnost v tahu ohybem (Pa),
 F maximální zatěžovací síla (N),
 L vzdálenost mezi podporami (m),
 b šířka trámce (m),
 h výška trámce (m).



Obrázek 22: Uspořádání tříbodové zkoušky pevnosti v tlaku ohybem.

Při zkoušce tříbodovým ohybem bylo provedeno zaznamenání dat pracovního diagramu, na jejichž základě byla dopočtena pohlcená energie potřebná pro úplné porušení vzorku. Vstupní data se pro další zpracování musela upravit. Úpravou dat se myslí eliminace zatlačení podpor prodloužením směrnici tečny nástupné větve diagramu a posunutí směrnice s průsečíkem osy x do počátku souřadnicového systému $[0, 0]$. Graficky je výsledek možno vidět na diagramu (Obrázek 23), kde červená barva znázorňuje upravená data zkoušky. Eliminace náběhu nástupné větve je z důvodu očištění výsledku vlivem spotřebování práce na zatlačení podpor do vzorku a zatlačení zatěžovacího nástroje. Pokud by existovala funkce, která dokonale popíše upravená data, mohla by se použít integrace dle vztahu (Rovnice 9). Bohužel takovou funkci neznáme, proto jsme použili integraci plochy numerickou cestou. Integrace byla provedena pomocí programu MS Excel. Výsledkem je množství energie vztažené na plochu průřezu, které je třeba vykonat na celkovou destrukci vzorku. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 11) (7).

Rovnice 9: Práce působící síly (4).

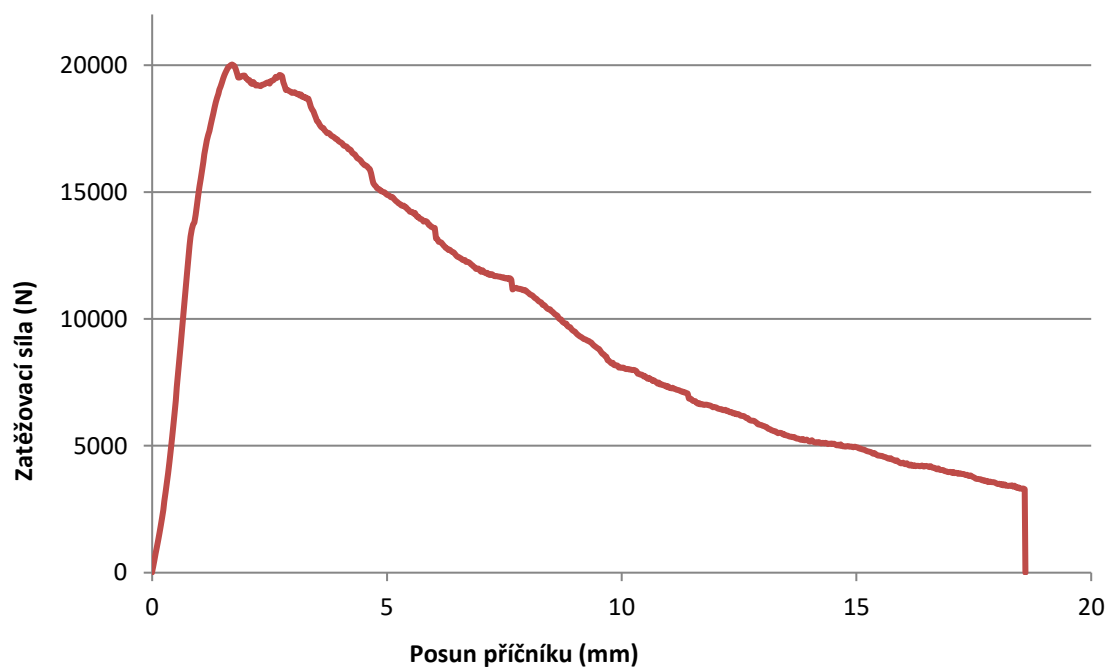
$$E_f = \int_0^{\delta_{\max}} P \, d\delta \quad 9.$$

Kde: E_f práce působící síly (J),
 δ_{\max} maximální hodnota posunu zkoušky (m),
 P funkce zatěžovací zkoušky (N).

Rovnice 10: Pohlčená energie na jednotku průřezu (4).

$$G_f = \frac{E_f}{bh} \quad 10.$$

Kde: G_f pohlčená energie (J/m²),
 b šířka vzorku (m),
 h výška vzorku (m).

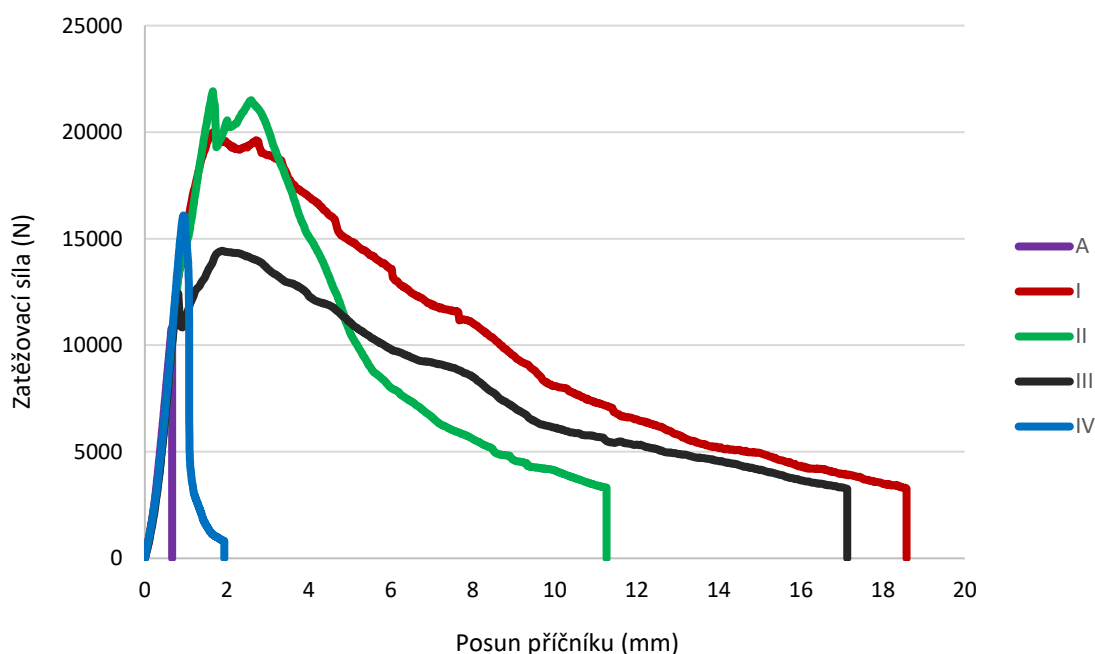


Obrázek 23: Pracovní diagram tříbodové zkoušky.

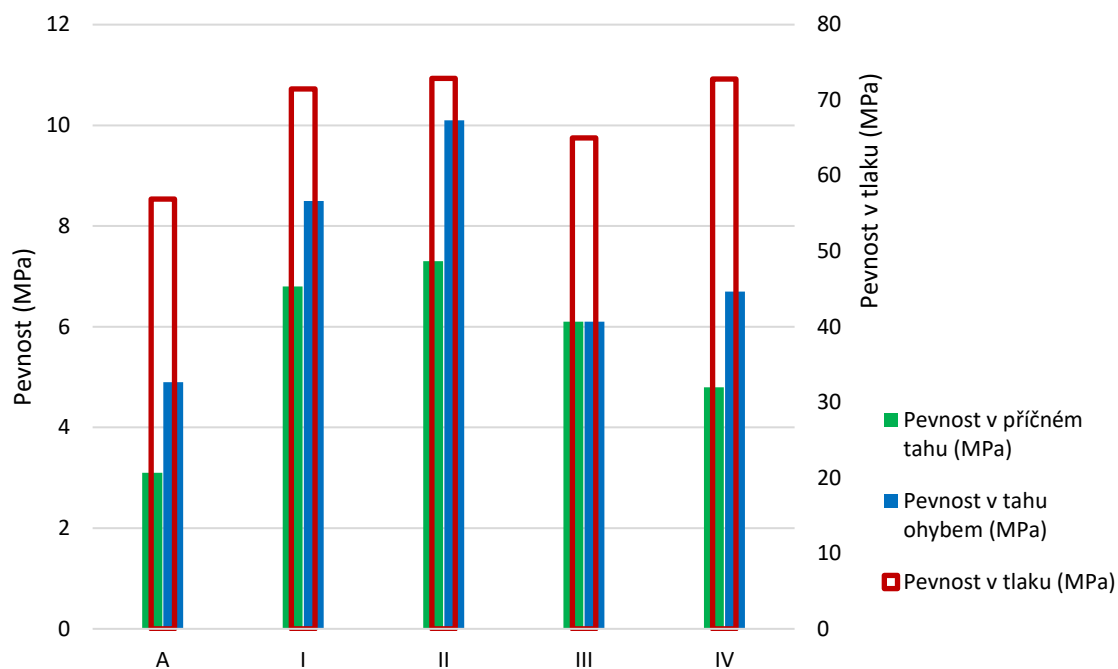
Dle tabulky (Tabulka 11) s vyhodnocením zkoušek komerčně dostupných drátků je zřejmé, že jako nejlepší drátky do betonové směsi jsou drátky obsažené ve směsi II. Směs II má nejlepší tlakové i tahové pevnosti při menší objemové hmotnosti z uvedených drátkobetonů. Směs I má též dobré vlastnosti, zejména parametr pohlcené energie, kde dosáhla největší hodnoty 19 kJ/m² a jde tak o velice duktilní směs. Naopak u směsi IV, která je svými pevnostními parametry průměrná, absorbuje nejmenší množství pohlcené energie k poškození trámce. Záznam a charakter zkoušky tříbodovým ohybem připomínal tzv. křehký lom, který je charakteristický u prostého betonu. Směs IV je obdobná směsi A0-2, která obsahuje stejný typ drátků se stejným hmotnostním dávkováním.

Tabulka 11: Výsledky pevností referenčních vzorků s komerčními drátky.

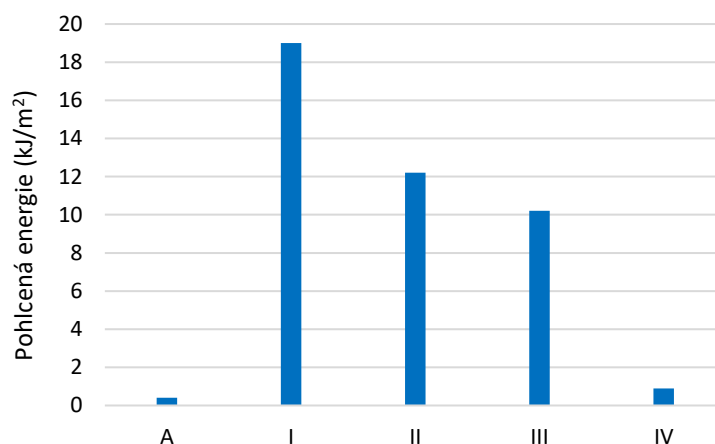
Směs:	A	I	II	III	IV
Objemová hmotnost (kg/m ³)	2263	2356	2343	2354	2377
Pevnost v tlaku (MPa)	56,9	71,5	72,9	65,0	72,8
Pevnost v příčném tahu (MPa)	3,1	6,8	7,3	6,1	4,8
Pevnost v tahu ohybem (MPa)	4,9	8,5	10,1	6,1	6,7
Pohlcená energie (kJ/m ²)	0,4	19,0	12,2	10,2	0,9



Obrázek 24: Pracovní diagram směsí s komerčními drátky.



Obrázek 25: Graf dosažených výsledků experimentu s komerčními drátky.



Obrázek 26: Graf pohlcené energie vzorků s komerčními drátky.

Z uvedených výstupů, které charakterizují chování jednotlivých směsí je zřejmé, že z pohledu více kritérií dosahuje nejlepších výsledků směs I a II. Směs III se zdá být svými výsledky horší než zmíněné předchozí směsi. Směs IV se zdá být pevností v tlaku srovnatelná s ostatními. Z grafu (Obrázek 24) je zřejmé, že směs IV se při zatěžovací zkoušce chová jako nevyztužená směs A. V tomto případě je zřejmé, že drátky mají jen omezený příznivý vliv na zvýšení konečných pevností. Drátky plní spíše jen funkci pro omezení smršťovacích trhlin, což má příznivý vliv na celistvost prvku a tím částečně zvyšuje duktilitu ztvrdlého betonu.

Po vyhodnocení srovnávacích testů komerčních drátků bylo přistoupeno k přípravě a betonáži vzorků na základě vstupních materiálů vzniklých ze zpracování pneumatik a dalších pryžových výrobků. Opět byla použita referenční směs typu A do které bylo přidáno stejné množství drátků jako u komerčních drátků. Vstupní surovinou jsou opět drátky, které jsou částečně zpracované. Uvedené síto 20 a 25 mm je síto pod dvouhřídelovým drtičem na recyklační lince. Drtič je přitom druhým drtičem v pořadí, síto pak udává jemnost mletí pryže. Následně jsou drátky ze směsi pryže a drátků separovány pomocí magnetického separátoru. Dalším typem drátků jsou drátky z černých hadic pro hydraulické použití, Tyto drátky jsou spíše raritou, které se nám podařilo separovat, ale spíše půjde o směs drátků z veškerých gumárenských výrobků, kterou můžeme jakkoliv zpracovávat.

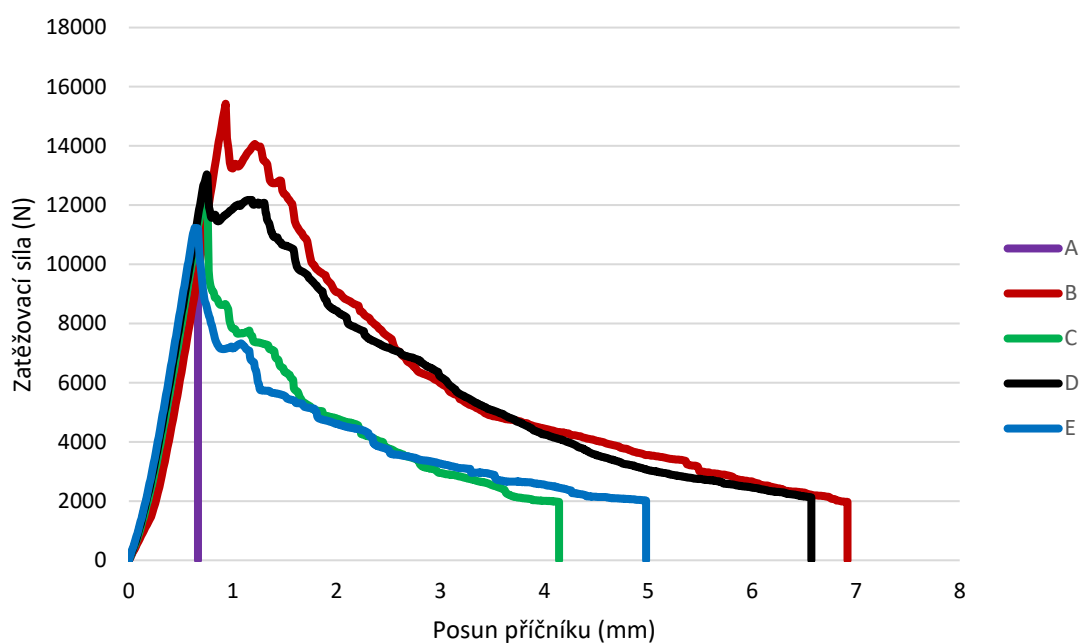
Tabulka 12: Směsi s odpadními drátky.

Složky		A	B	C	D	E
Dávkování		(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)
Kamenivo	0-4 mm Dobříň	980	980	980	980	980
	4-8 mm Sýkořice	210	210	210	210	210
	8-16 mm Sýkořice	480	480	480	480	480
Cement	CEM I 42,5R	400	400	400	400	400
Mikrosilika	Stachesil	35	35	35	35	35
Plastifikátor	Stachement 2000	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Voda	pitná	180	180	180	180	180
Drátky	referenční směs	0	-	-	-	-
	Čisté drátky přes síto 25 mm	-	50	-	-	-
	Čisté drátky	-	-	50	-	-
	Hadice bez mag. separace, síto 25 mm	-	-	-	50	-
	Hadice bez mag. separace, síto 20 mm	-	-	-	-	50

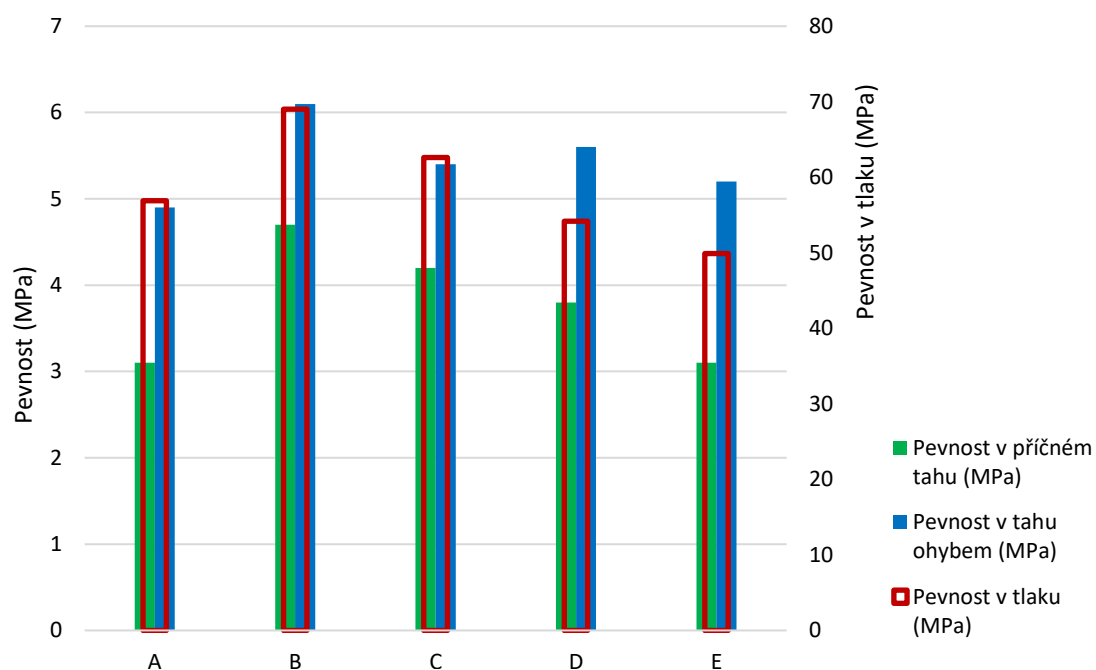
Uvedené směsi zrály po dobu 28 dnů na vzduchu při stejných podmínkách jako směsi označované I-IV (Tabulka 10). Po 28 dnech byly vzorky podrobené stejným zkouškám jako směsi s komerčními drátky. Výsledky jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 13). Směs s nejlepšími výsledky napříč veškerými pevnostmi je směs B, která je i z uvedených směsí nejhutnější, však není hutná natolik jako směsi s komerčními drátky. Vypočtenou pohlcenou energií se s komerčními drátky může porovnávat jen směs B, která se z pohledu energie jeví jako nejlepší.

Tabulka 13: Výsledky pevností referenčních vzorků s odpadními drátky.

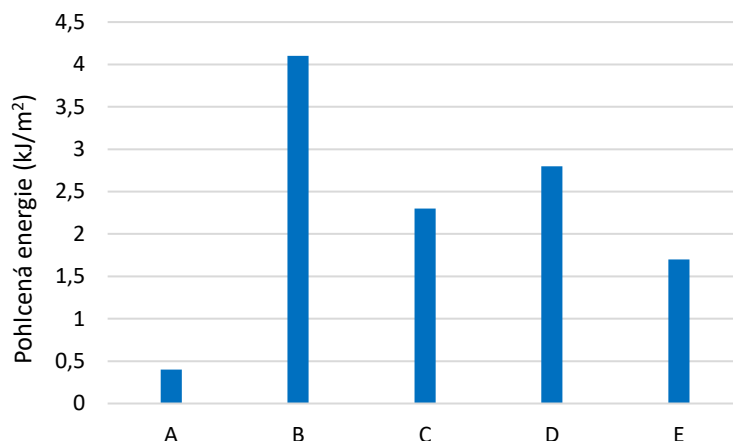
Směs:	A	B	C	D	E
Objemová hmotnost (kg/m ³)	2263	2291	2278	2241	2226
Pevnost v tlaku (MPa)	56,9	69,0	62,6	54,2	49,9
Pevnost v příčném tahu (MPa)	3,1	4,7	4,2	3,8	3,1
Pevnost v tahu ohybem (MPa)	4,9	6,1	5,4	5,6	5,2
Pohlcená energie (kJ/m ²)	0,4	4,1	2,3	2,8	1,7



Obrázek 27: Pracovní diagram směsí s odpadními drátky.



Obrázek 28: Graf dosažených výsledků experimentu s odpadními drátky.



Obrázek 29: Graf pohlčené energie vzorků s odpadními drátky.

Z uvedených dat je zřejmé, že směsi s odpadními drátky mají stejný charakter porušení. Tahové i tlakové parametry vyztužených směsí jsou obdobné. Viditelný rozdíl v chování směsí je pouze u parametru množství pohlčené energie. Důležité je, že všechny vyztužené směsi jsou duktilní, bez náhlého kolapsu.

3.9 Pull-Out testy

Pull-out testy neboli v překladu výtažná zkouška je zkouška, kdy je do vzorku směsi v našem případě betonu vybetonováno vlákno či drátek. Po vytvrdnutí betonu se připravený vzorek umístí do zatěžovacího standu a upne se v čelistech. Při zatěžování se zkoumá závislost mezi silou vytahování vlákna ze vzorku a deformace. Významným bodem na vzniklém pracovním diagramu je bod s maximální zatěžovací silou, po kterém je vlákno ze vzorku vytaženo. Na základě takové zkoušky lze odvodit minimální délku drátku ve směsi tak, aby byla naplno využita jeho maximální tahová pevnost R_m (2).

Pro přípravu vzorků byly použity nejdelší drátky vyskytující se v sadě surových drátků. Použitá směs byla referenční, upravená typu A. Směs byla vybetonována do testovacích krychlí o hraně 50 mm, do kterých byly umístěny vzorky drátků tak, aby byly zabetonovány jen částečně. Na obrázku (Obrázek 30) je vidět upnutý vzorek v zatěžovacím standu. Zkouška probíhala vytažením drátku z betonové směsi, kdy sledovanými parametry byly maximální působící síla na drátek a délka výsunu drátku ze směsi. Během zkoušky byl zaznamenán pracovní diagram (Obrázek 31) kde jsou zřetelné meze výsunu drátku ze směsi s postupným vytahováním drátku za zmenšující se působící síly (2).

Rovnice 11: Výpočet tečného napětí.

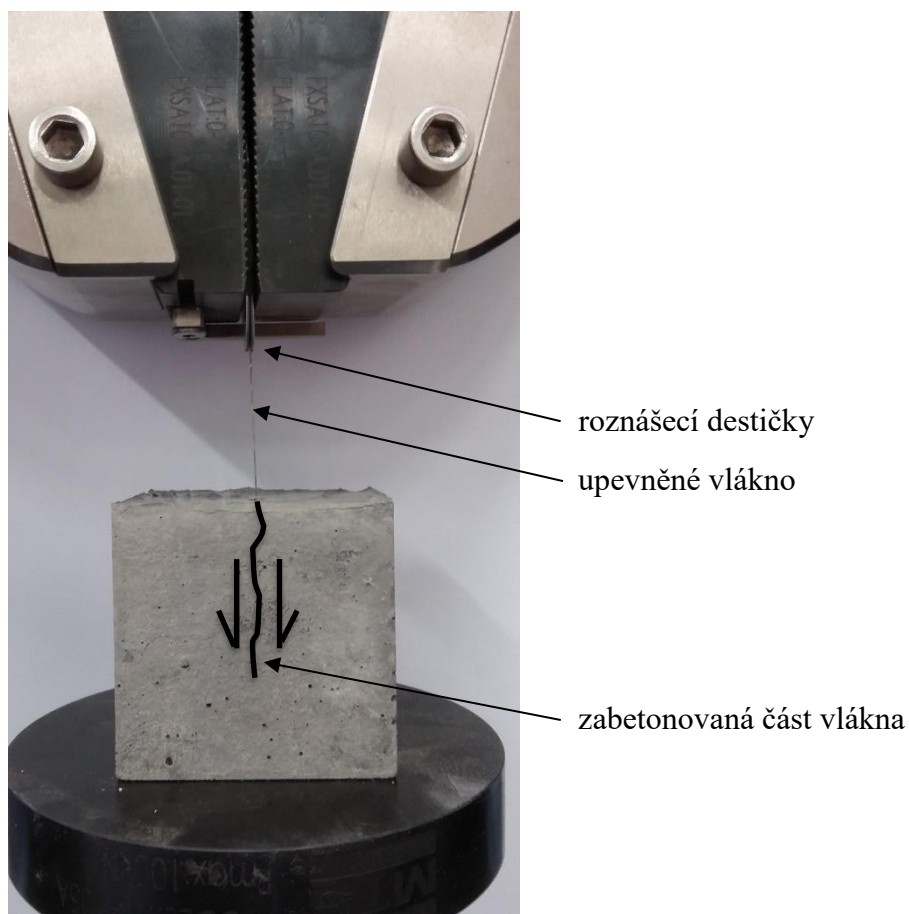
$$\tau = \frac{F_m}{A} \quad 11.$$

Kde: τ Tečné napětí na styku vlákno/ beton (Pa),
 F_m maximální působící síla na drátek (m),
 A kontaktní plocha drátku s betonem (m²).

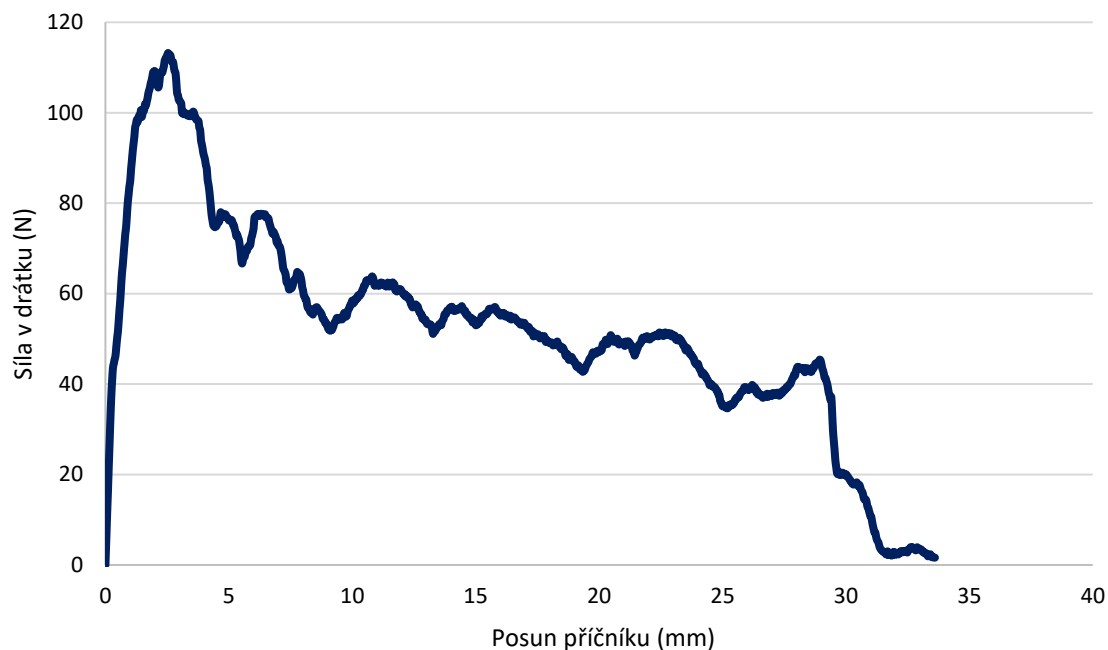
Rovnice 12: Výpočet kotevní délky.

$$l_k = \frac{F_m}{\tau o} \quad 12.$$

Kde: l_k Kotevní délka (mm),
 o obvod drátku (mm).



Obrázek 30: Pull-out zkouška.



Obrázek 31: Pracovní diagram pull-out zkoušek.

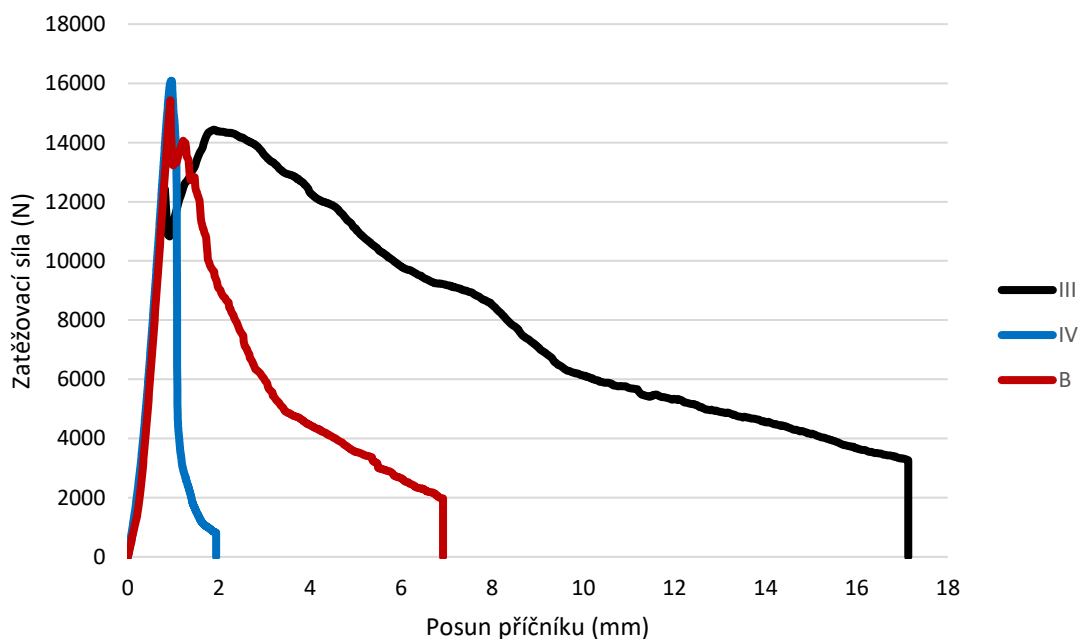
Průběh zkoušky bohužel provázely problémy se špatným upnutím drátku do čelistí zatěžovacího lisu, ten byl vyřešen roznášecími destičkami. Výsledky pull-out testů se vyhodnotily na základě maximální působící zatěžovací síly a parametrů drátku. Výsledky zkoušek byly zpracovány dle uvedených rovnic (Rovnice 11 a Rovnice 12). Působící tečné napětí na mezi drátku s betonem bylo na hodnotě 3,6 MPa a z této hodnoty vycházející nutná kotevní délka drátku 33,6 mm. Je nutné doplnit, že některé drátky použité ve vzorcích byly částečně zakřivené a nepochybně značně ovlivňovaly soudržnost.

Z uvedených hodnot, zejména hodnoty kotevní délky 33,6 mm a hodnoty délky drátku podsítné frakce vzniklé tříděním (Tabulka 7) je zřejmé, že jdou proti sobě. Parametr necuchání se výztuže ve směsi, než dostatečné zakotvení je nepochybně vyšší. Z toho důvodu by nebyl naplno použit potenciál materiálových charakteristik drátků. Jistým ošetřením by byla možnost profilace drátků po své délce tak, aby se nutná kotevní délka zmenšila a pevnosti drátků se mohly dokonale využít.

3.10 Diskuze výsledků

Dle všeobecných předpokladů je zřejmé, že drátky mají pozitivní vliv na konečné pevnosti betonové směsi. S ohledem na výsledky zkoušek je zřejmé, že drátky odpadní mají jen částečný, ale nikoliv malý pozitivní vliv na betonovou směs oproti drátkům komerčním. V případě porovnání směsí *III* a *B* mají obdobné pevnostní parametry, jak tahové, tak tlakové. V parametru množství pohlcené energie má směs *B* oproti směsi *III* poloviční hodnotu, která naznačuje menší duktilitu materiálu viz graf (Obrázek 32), ale stále větší duktilitu než směs *IV* s komerčními drátky. Co se týče tlakových pevností, u komerčních drátků až na jednu výjimku nebyl větší rozptyl. U směsí s odpadními drátky byl rozptyl velký, nejlépe dopadla směs *B*. Směs *B* je tedy jakási nejlepší směs. Obsažené drátky jsou odpadní, ale částečně před zpracovány. Šlo o prosetí na sítu o velikosti oka 25 mm. To nám ukazuje nutnost tyto drátky průmyslově zpracovat tak, aby byly použitelné v praxi a více se přiblížili vlastnostem drátků průmyslově vyráběných z čisté suroviny.

Z uvedených výsledků vlivem prosetí drátků a velikosti ok sít jdou protichůdné požadavky. Nezbyvá než vzít tyto požadavky jako krajní meze a provést mnoho měření a pokusů v uvedených mezích a sledovat reálné výsledky, které potvrdí skutečnou ideální hodnotu jak ok sít, tak ideální délku drátku. Je třeba doplnit, že drátky ať už komerční či odpadní mají pozitivní vliv i na fázi tuhnutí a tvrdnutí, kdy působí jako odpor při tvorbě výsušných trhlin. To má nezanedbatelný vliv nejen na konečné pevnosti směsi, ale například i na vizuální dojem konstrukce a s tím spojená menší náročnost na možnou sanaci těchto trhlin.

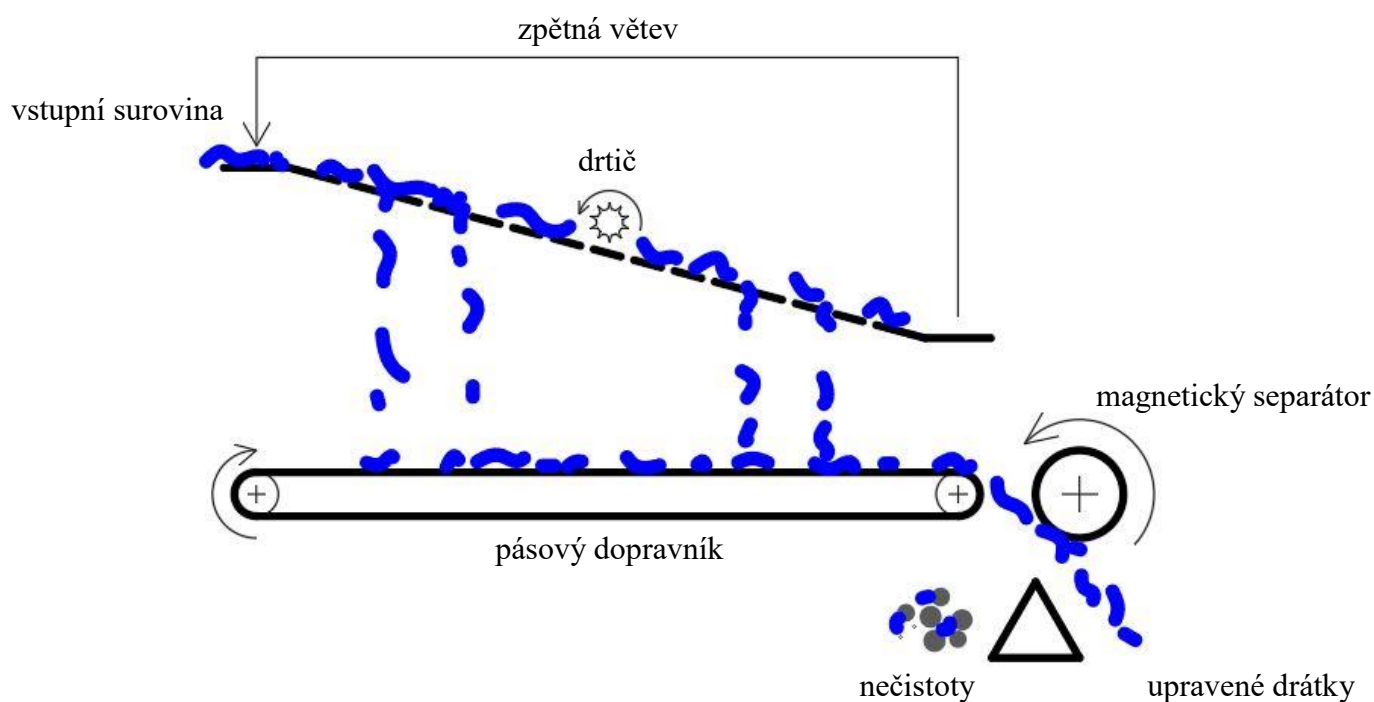


Obrázek 32: Pracovní diagram porovnatelných směsí.

3.11 Návrh zpracující linky

Pro potřebu dalšího zpracování drátků a vylepšení několika nežádoucích vlastností odpadních drátků pro potřeby betonů a drátkobetonů je vhodná stavba třídící linky, která vlastnosti upraví tak, aby drátky bylo možné použít.

Do stávající třídící linky by se na výstup přidalo zařízení, které by se staralo o takovou úpravu drátků, aby je bylo možné bez problémů použít do směsi pro drátkobeton. Na schématu (Obrázek 33) je uveden návrh procesu úpravy, kdy vhodné drátky propadávají sítí a nevhodné drátky se drtí. Nakonec je surovina vyčištěna separátorem od zbytků nečistot.



Obrázek 33: Schéma zpracování drátků.

4 Závěr

Cílem diplomové práce bylo zjištění možnosti využití odpadních drátků ze zpracování ojetých pneumatik pro přípravu drátkobetonů. Drátky se zdály být kvalitním materiálem pro použití jako rozptýlené výztuže, proto bylo zapotřebí tuto možnost ověřit na reálných experimentech.

Z výsledků rešeršní části je zřejmé, že trend množství ojetých pneumatik je stále vzrůstající a v příštích několika letech se tento vývoj dramaticky nezmění. Odpadové hospodářství s pneumatikami se zlepšilo díky správci výběru pneumatik společnosti Eltma tak, že odpadní pneumatiku lze odevzdat na kterémkoliv odběrném místě. Jde tak o obdobu výběru elektronických zařízení. Z recyklačního procesu pneumatiky mimo jiné vzniká částečně znečištěná surovina ocelových vláken. Ta byla předmětem diplomové práce.

Bylo zjištěno, že směs s drátky tvoří shluky drátků, které jsou nerozmíchatelné. Tyto shluky jsou zapříčiněny podílem drátků s nevhodným tvarem, které se do sebe zamotávají. Jak ukazují výsledky měření, prosévací zkouškou by bylo reálné část nevhodných drátků odseparovat. Nevhodným tvarem bylo myšleno nadměrné zahnutí drátků s háčky na jejich koncích. Jen samotnou prosévací zkouškou na sítích s vhodnou velikostí ok by bylo možné se z podílu 58 % nevhodných drátků dostat na hodnotu 72 %.

Pro srovnání vlivu komerčních drátků s odpadními drátky v betonu byly provedeny porovnávací vzorky, ty byly normové. Byla použita primární směs, do které byly přidávány jednotlivé druhy drátků se stejným dávkováním. Pro každou směs byla stanovena pevnost v tlaku, příčném tahu, tahu ohybem a velikost pohlcené energie.

Dále byly provedeny trhací zkoušky odpadních ocelových drátků. Hlavním výsledkem bylo určení meze pevnosti drátků na hodnotě 2687 MPa. Z tohoto pohledu šlo o velmi kvalitní vysokopevnostní materiál. Výsledkem pull-out testů byly dvě hlavní informace, a to kotevní délka o hodnotě 33,6 mm a maximální tečné napětí na povrchu beton s vláknem na hodnotě 3,6 MPa.

Pevnostní výsledky vzorků drátkobetonu z odpadních ocelových vláken ukázaly, že některé směsi se vyrovnají směsím z komerčně dostupných drátků. Ostatní směsi ukázaly, že mají jen částečný pozitivní vliv na výsledné pevnosti betonových směsí. Zlepšení se prokázalo jak ve zlepšení tahových, tak i tlakových pevnostech. Směs z komerčních odpadních drátků označenou jako IV neprokázala žádný vliv v nárůstu houževnatosti betonu. Oproti tomu všechny směsi z odpadních drátků z pneumatik prokázaly výrazný nárůst v houževnatosti betonu, však nikoliv tak velkou jako ostatní komerční drátky.

Použití odpadních ocelových drátků z pryžových produktů recyklační linky pro využití v drátkobetonech se naplno potvrdilo. Vliv drátků měl pozitivní vliv na nárůst pevností betonu a výraznému zlepšení houževnatosti. Bohužel toto použití má i negativní část, kdy se ve směsi tvoří shluky drátků. Tato vlastnost by šla eliminovat další úpravou drátků. Bylo by tedy zapotřebí pokročilé dokončovací úpravy pro průmyslové použití.

V případě reálného použití drátků by šlo jistě o ekologický přínos, kdy se najde sekundární využití odpadní suroviny a zároveň i ekonomický přínos, kdy by šlo nepochybně o levnější zdroj ocelové rozptýlené výztuže.

5 Literatura

- (1) Antonio Caggiano, Paula Folino, Carmine Lima, Enzo Martinelli, Marco Pepe, *On the mechanical response of Hybrid Fiber Reinforced Concrete with Recycled and Industrial Steel Fibers*, In Construction and Building Materials, Volume 147, 2017, Pages 286-295, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.160>.
- (2) M.A. Aiello, F. Leuzzi, G. Centonze, A. Maffezzoli, *Use of steel fibres recovered from waste tyres as reinforcement in concrete: Pull-out behaviour, compressive and flexural strength*, In Waste Management, Volume 29, Issue 6, 2009, Pages 1960-1970, ISSN 0956-053X, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.12.002>.
- (3) R.S. Olivito, F.A. Zuccarello, *An experimental study on the tensile strength of steel fiber reinforced concrete*, In Composites Part B: Engineering, Volume 41, Issue 3, 2010, Pages 246-255, ISSN 1359-8368, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.12.003>.
- (4) Fernández Canteli, A; Castañón, L; Nieto, B; Lozano, M; Holusová, T; a kol., *Determining fracture energy parameters of concrete from the modified compact tension test*; Issue 9, 2014, <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.30.46>
- (5) Girskas, G. & Nagrockienė, D. (2016). *The Use of Steel Cord Scrap in Concrete*. Construction Science, pp. 22-26. doi:10.1515/cons-2016-0004
- (6) Guoqiang Li, Gregory Garrick, John Eggers, Christopher Abadie, Michael A. Stubblefield, Su-Seng Pang, *Waste tire fiber modified concrete*, In Composites Part B: Engineering, Volume 35, Issue 4, 2004, Pages 305-312, ISSN 1359-8368, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2004.01.002>.
- (7) Y.C. Guo, J.H. Zhang, G. Chen, G.M. Chen, Z.H. Xie, *Fracture behaviors of a new steel fiber reinforced recycled aggregate concrete with crumb rubber*, In Construction and Building Materials, Volume 53, 2014, Pages 32-39, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.075>.
- (8) POUL, Ondřej; BP *Ukončení životnosti pneumatik* [Online] [Citace: 2. 11 2017.]
- (9) DUFKA, Roman; BP *Konstrukce pneumatik a jejich provozní vlastnosti* [Online] [Citace: 2. 11 2017.]
- (10) CHYLÍK, Roman; DP *Mechanické vlastnosti a trvanlivost betonu s přísadou gumového granulátu* [Online] [Citace: 10. 11 2017.]
- (11) Technologie objemového tváření – tažení drátů a profilů [Online] [Citace: 10. 11 2017.]
Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/04.htm

- (12) MŽP [Online] [Citace: 2. 11 2017.] - *Vybrané ukazatele odpadového hospodářství v oblasti zpětného odběru pneumatik do roku 2015*
Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/vybrane_ukazatele_odpadoveho_hospodarstvi/\\$FILE/OODP-vyhodnoceni_2002-2015_pneumatiky-20170217.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/vybrane_ukazatele_odpadoveho_hospodarstvi/$FILE/OODP-vyhodnoceni_2002-2015_pneumatiky-20170217.pdf)
- (13) ČSN EN 14889-1 - *Vlákna do betonu – ocelová vlákna*, květen 2007
- (14) ŠAFNER, Karel; Montstav s.r.o. osobní konzultace
- (15) MACHÁČ; Jan. firma ŽDB Bohumín, *Interní dokument*
- (16) HORVATH, Ján; Kordárna Plus
<http://www.uh.cz/kordarnanew/page/cz/produkty/kordove-tkaniny/vyrobky.php>
- (17) "pneumatika". [Online] [Citace: 1. 11 2017.]
Dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/konstrukce-pneumatiky/>
- (18) „osnova“ [Online] [Citace: 1. 11 2017.]
Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Osнова_\(textil\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Osнова_(textil))
- (19) „recyklace“ Montstav s.r.o. [Online] [Citace: 8. 11 2017.]
Dostupné z: <http://www.montstav.cz/recyklace/>
- (20) „protektor“ [Online] [Citace: 47. 11 2017.]
Dostupné z: <http://www.topkb.cz/portfolio-item/protektory/>
- (21) „magnetická deska“ Magsy [Online] [Citace: 5. 12 2017.]
Dostupné z: <http://www.magsy.cz/24791-magnet-nad-dopravnik-magneticka-deska>
- (22) „vlákna do betonu“ Feron [Online] [Citace: 5. 12 2017.]
Dostupné z: <https://online.ferona.cz/detail/24607/ocelova-vlakna-do-betonu-en-14889-1-rozmer-1-05x50>

6 Seznam obrázků

Obrázek 1: Konstrukce pláště pneumatiky (17).	- 4 -
Obrázek 2: Patní lano (17).	- 5 -
Obrázek 3: Osnova tkaniny (18).	- 7 -
Obrázek 4: Protektorovaná pneumatika (20).	- 9 -
Obrázek 5: Magnetický separátor (21).	- 10 -
Obrázek 6: Hrubě vytríděné drátky	- 11 -
Obrázek 7: Jemně vytríděné drátky	- 11 -
Obrázek 8: Gumový granulát (19).	- 12 -
Obrázek 9: Ocelový drátek do betonu (22).	- 13 -
Obrázek 10: Oslabená místa drátků.	- 19 -
Obrázek 11: Pracovní diagram trhací zkoušky drátku.	- 20 -
Obrázek 12: Příprava směsi drátkobetonu se shluky drátků.	- 22 -
Obrázek 13: Měření geometrie drátku.	- 24 -
Obrázek 14: Histogram četností surových drátků.	- 24 -
Obrázek 15: Vhodné drátky.	- 25 -
Obrázek 16: Nevhodné drátky.	- 25 -
Obrázek 17: Histogram četností nadsítné frakce NAD1.	- 27 -
Obrázek 18: Histogram četností podsítné frakce POD1.	- 27 -
Obrázek 19: Pracovní diagram pilotní směsi.	- 30 -
Obrázek 20: Uspořádání zkoušky pevnosti v tlaku.	- 32 -
Obrázek 21: Uspořádání zkoušky pevnosti v příčném tahu.	- 33 -
Obrázek 22: Uspořádání tříbodové zkoušky pevnosti v tlaku ohybem.	- 34 -
Obrázek 23: Pracovní diagram tříbodové zkoušky.	- 35 -
Obrázek 24: Pracovní diagram směsi s komerčními drátky.	- 36 -
Obrázek 25: Graf dosažených výsledků experimentu s komerčními drátky.	- 37 -
Obrázek 26: Graf pohlcené energie vzorků s komerčními drátky.	- 37 -
Obrázek 27: Pracovní diagram směsi s odpadními drátky.	- 40 -
Obrázek 28: Graf dosažených výsledků experimentu s odpadními drátky.	- 40 -
Obrázek 29: Graf pohlcené energie vzorků s odpadními drátky.	- 41 -
Obrázek 30: Pull-out zkouška.	- 42 -
Obrázek 31: Pracovní diagram pull-out zkoušek.	- 43 -
Obrázek 32: Pracovní diagram porovnatelných směsí.	- 44 -
	- 50 -

Obrázek 33: Schéma zpracování drátků.	- 45 -
--	--------

7 Seznam tabulek

Tabulka 1: Produkce odpadních pneumatik v ČR (12).	- 7 -
Tabulka 2: Parametry ocelových vláken do betonu (22).	- 13 -
Tabulka 3: Produktová specifikace ocelových kordů firmy ŽDB Bohumín (15).	- 18 -
Tabulka 4: Mez pevnosti ocelových kordů (15).	- 19 -
Tabulka 5: Hmotnostní podíl složek v surovině.	- 21 -
Tabulka 6: Střední geometrické vlastnosti surových drátků.	- 25 -
Tabulka 7: Střední geometrické nadsítné a podsítné frakce surových drátků.	- 26 -
Tabulka 8: Prvotní směs porovnávací.	- 29 -
Tabulka 9: Výsledky pevností pilotních vzorků.	- 29 -
Tabulka 10: Směsi komerčních drátků.	- 31 -
Tabulka 11: Výsledky pevností referenčních vzorků s komerčními drátky.	- 36 -
Tabulka 12: Směsi s odpadními drátky.	- 39 -
Tabulka 13: Výsledky pevností referenčních vzorků s odpadními drátky.	- 39 -